

# PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL VISUAL EN LA RETINA

## PERCEPCIÓN VISUAL

Tema 2

Profesora María Cinta Puell

Grado de Óptica y Optometría

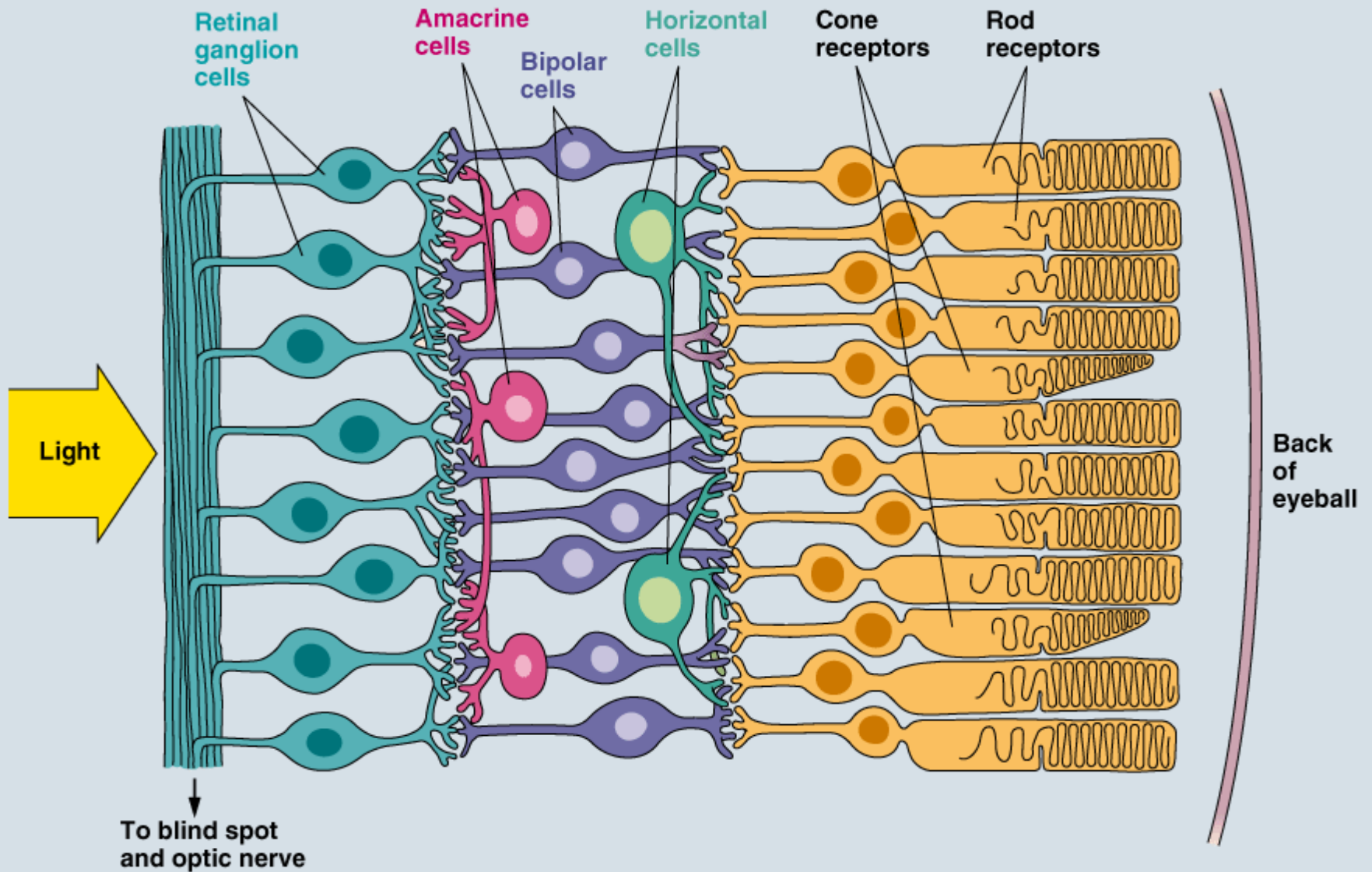
Universidad Complutense de Madrid

# Contenido

- Organización neuronal de la retina
- Conos y bastones
- Fotopigmentos
- Campos receptivos de células ganglionares
- Actividad eléctrica de las células de la retina
- Vías de centro-ON y centro-OFF
- Inhibición lateral

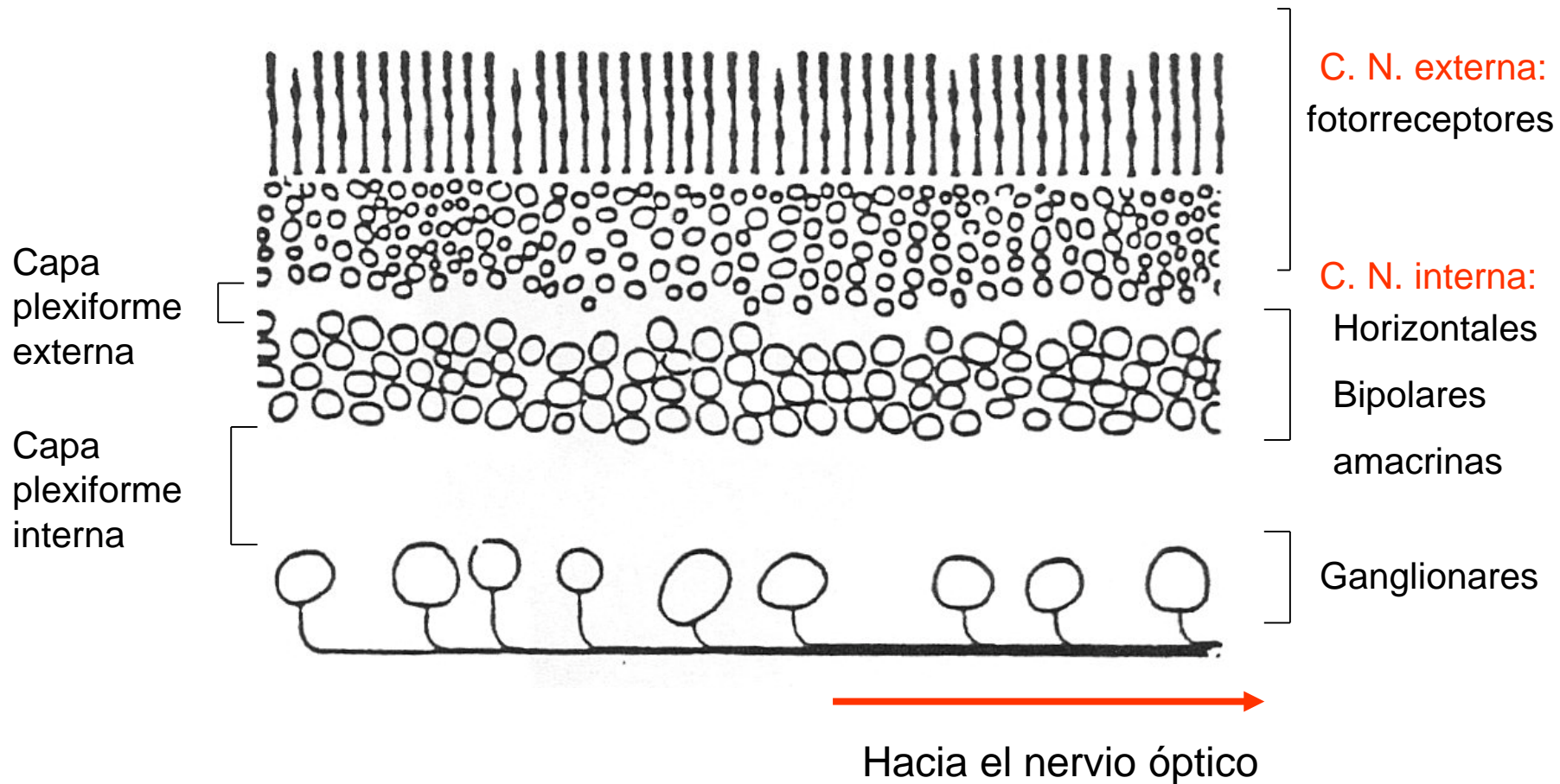
# Organizacion neuronal de la retina

- Compuesta de 5 capas de neuronas
  - Células fotorreceptoras
    - Bastones
    - Conos
  - Células horizontals (2 subtipos)
  - Células bipolares (10 subtipos)
  - Células amacrine (25-30 subtipos)
  - Células ganglionares (10-15 subtipos)

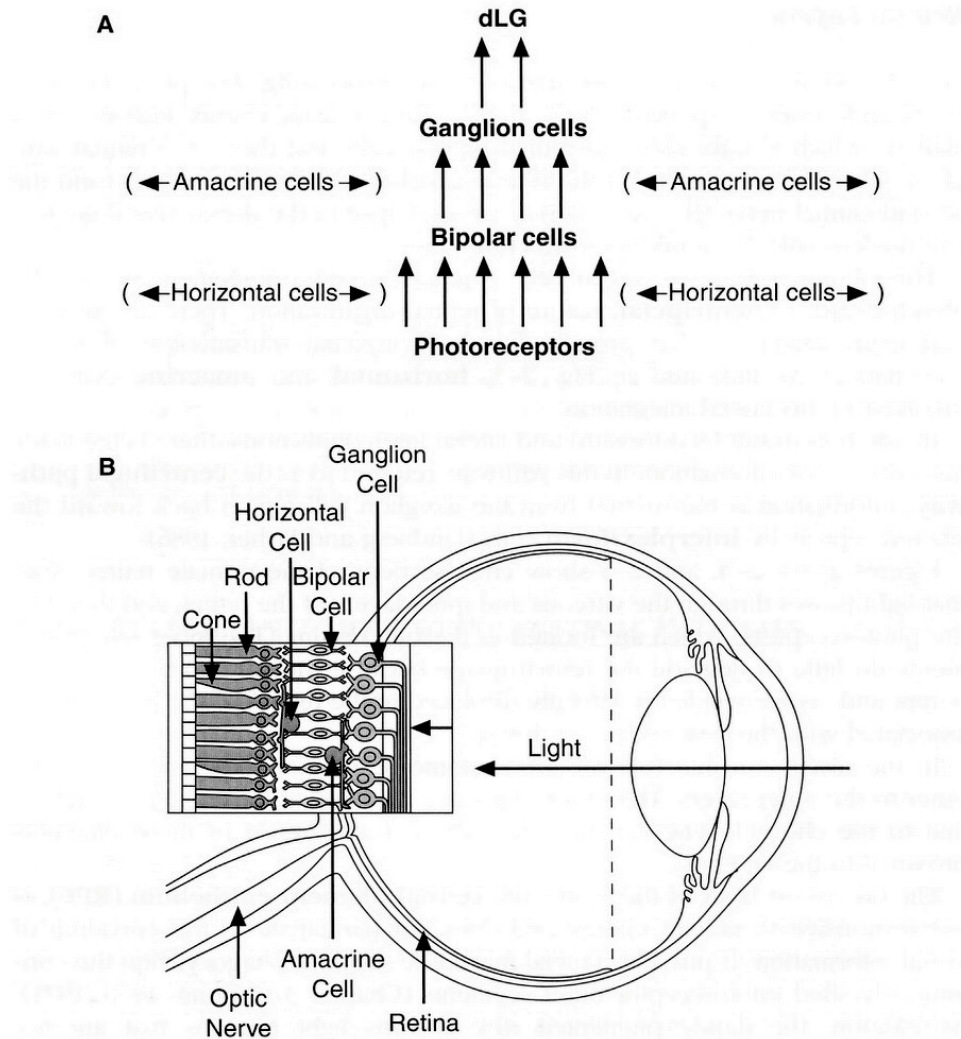




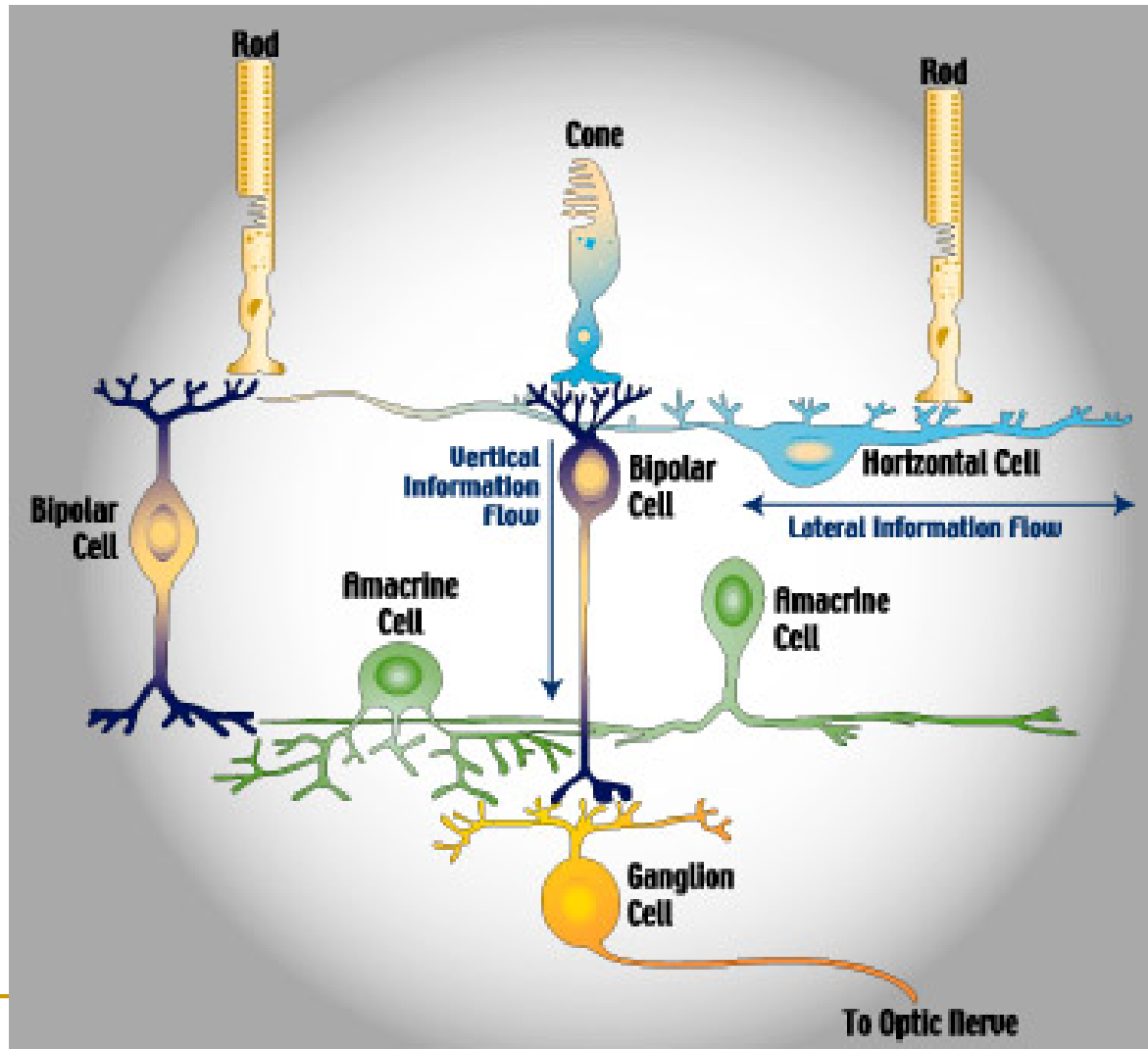
# Organización neuronal de la retina



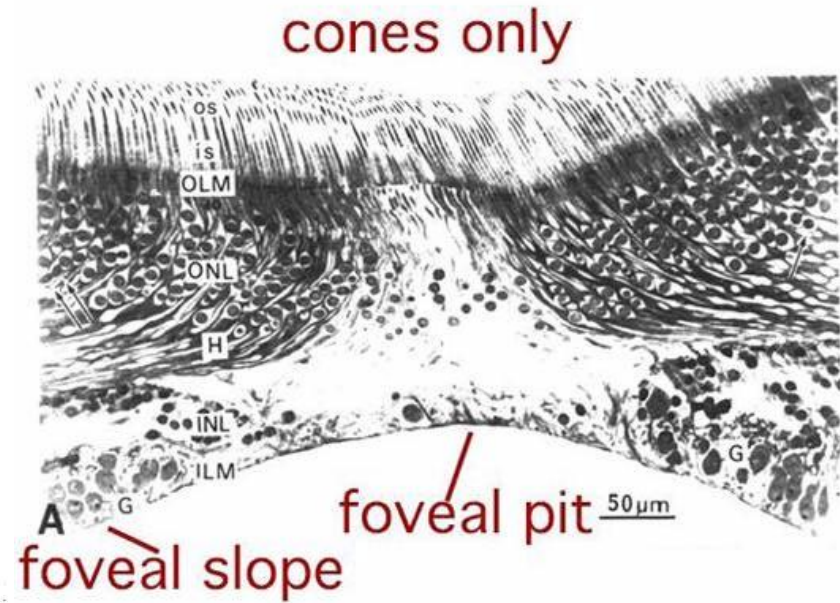
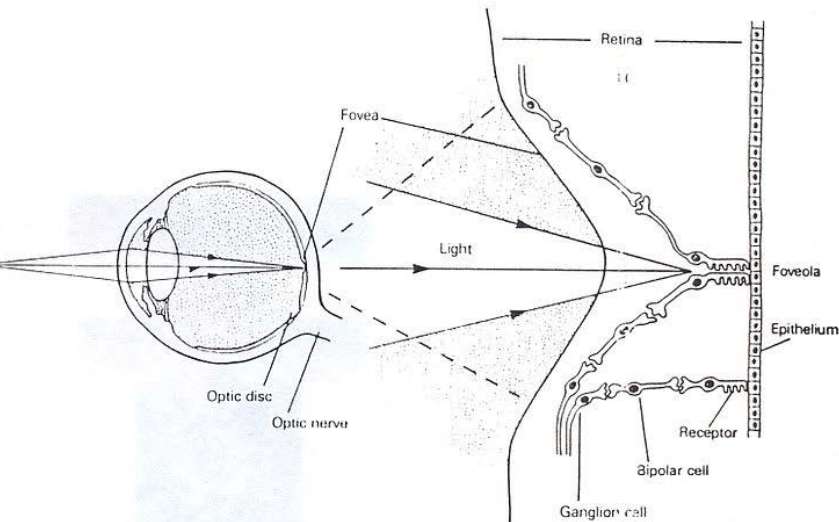
# Organización neuronal de la retina



# Flujo de información desde fotorreceptores hasta ganglionares



# La fovea



Desplazamiento lateral de células y fibras nerviosas para reducir la dispersión

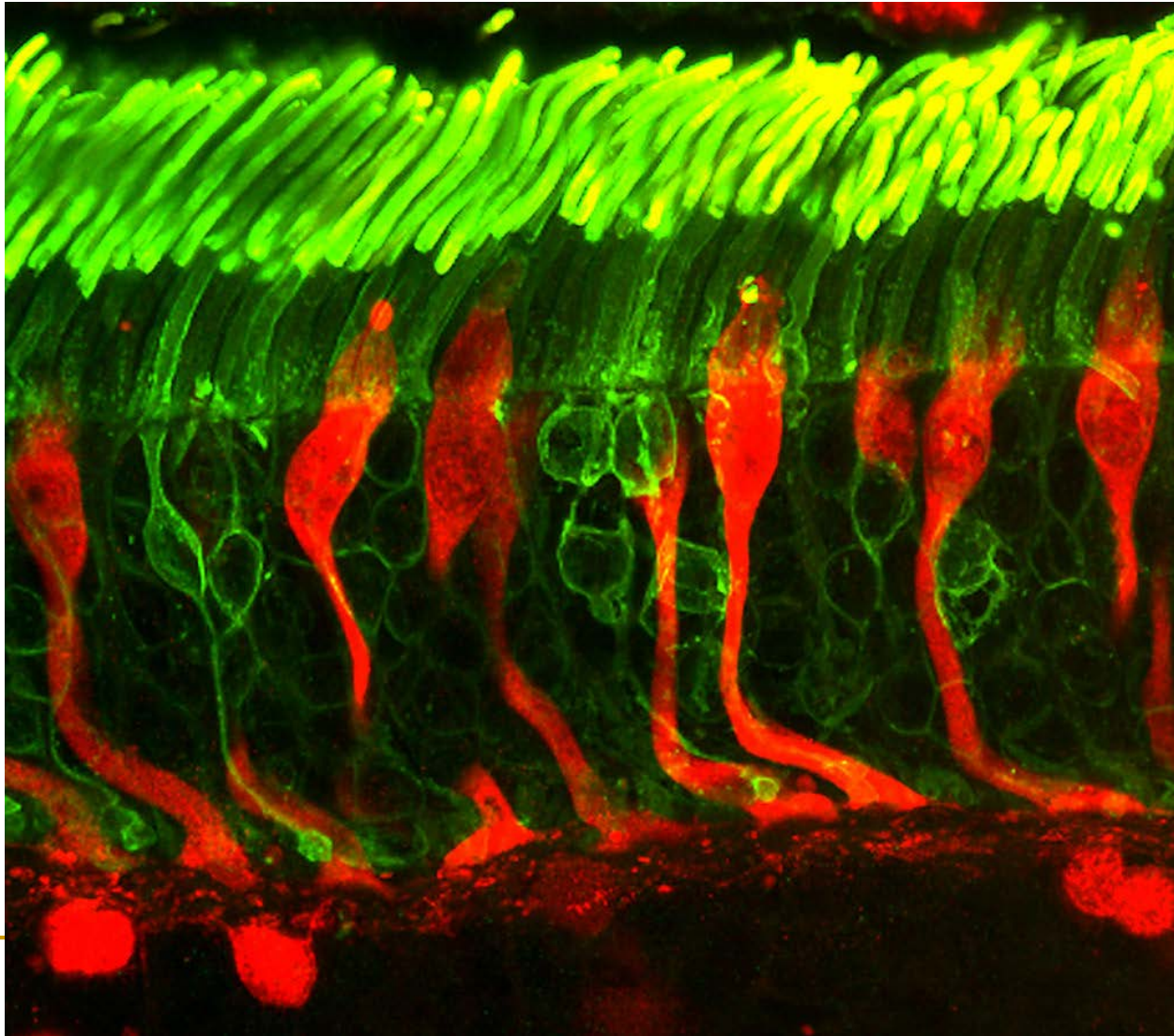
# Dimensiones de la zona foveal

- Diámetro de la mácula: 5,5 mm ( $18^\circ$ )
- Diámetro de la fovea central: 1,5 mm ( $5,2^\circ$ )
- Diámetro de la fóvea libre de bastones:  
0,5 mm ( $1,7^\circ$ )
- Diámetro de la foveola libre de bastones y capilares:  
0,3 mm ( $1^\circ$ )



# Sistema de conos y bastones

Bastones en verde y conos en rojo

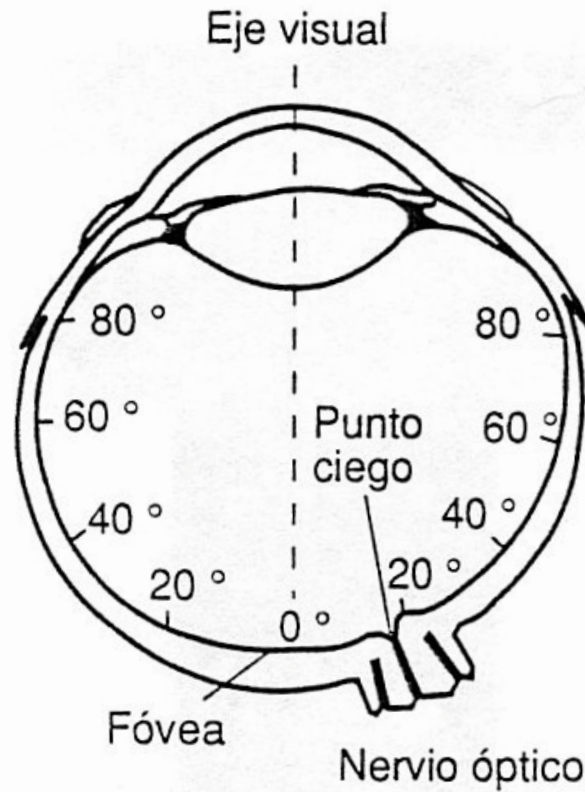


# Sistema de conos y bastones

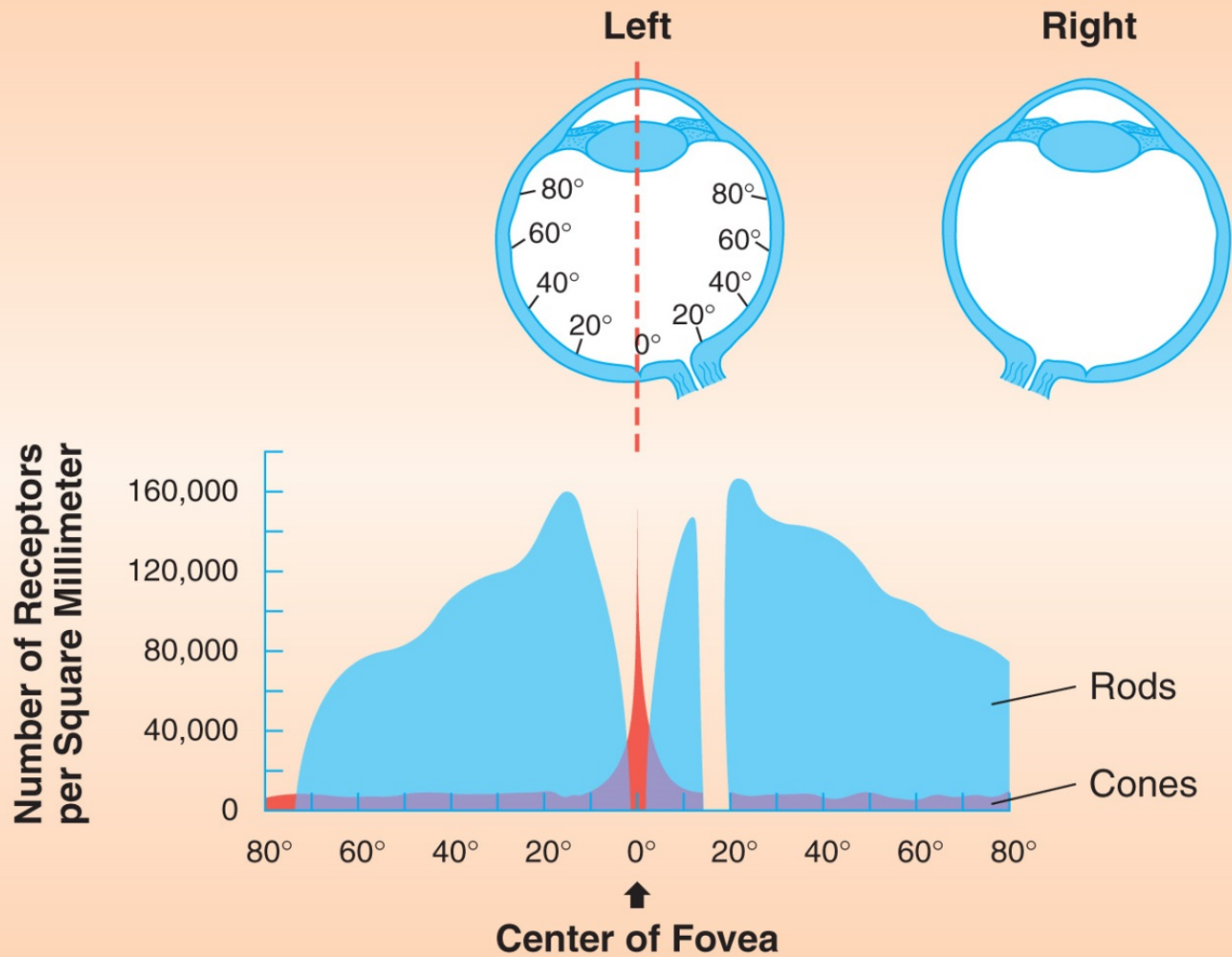
- 120 millones de bastones
- 6 millones de conos
- Tres tipos de conos diferentes
  - Conos L: sensibles a longitudes de onda larga
  - Conos M: sensibles a longitudes de onda media
  - Conos S: sensibles a longitudes de onda corta

# Distribución de fotorreceptores en retina

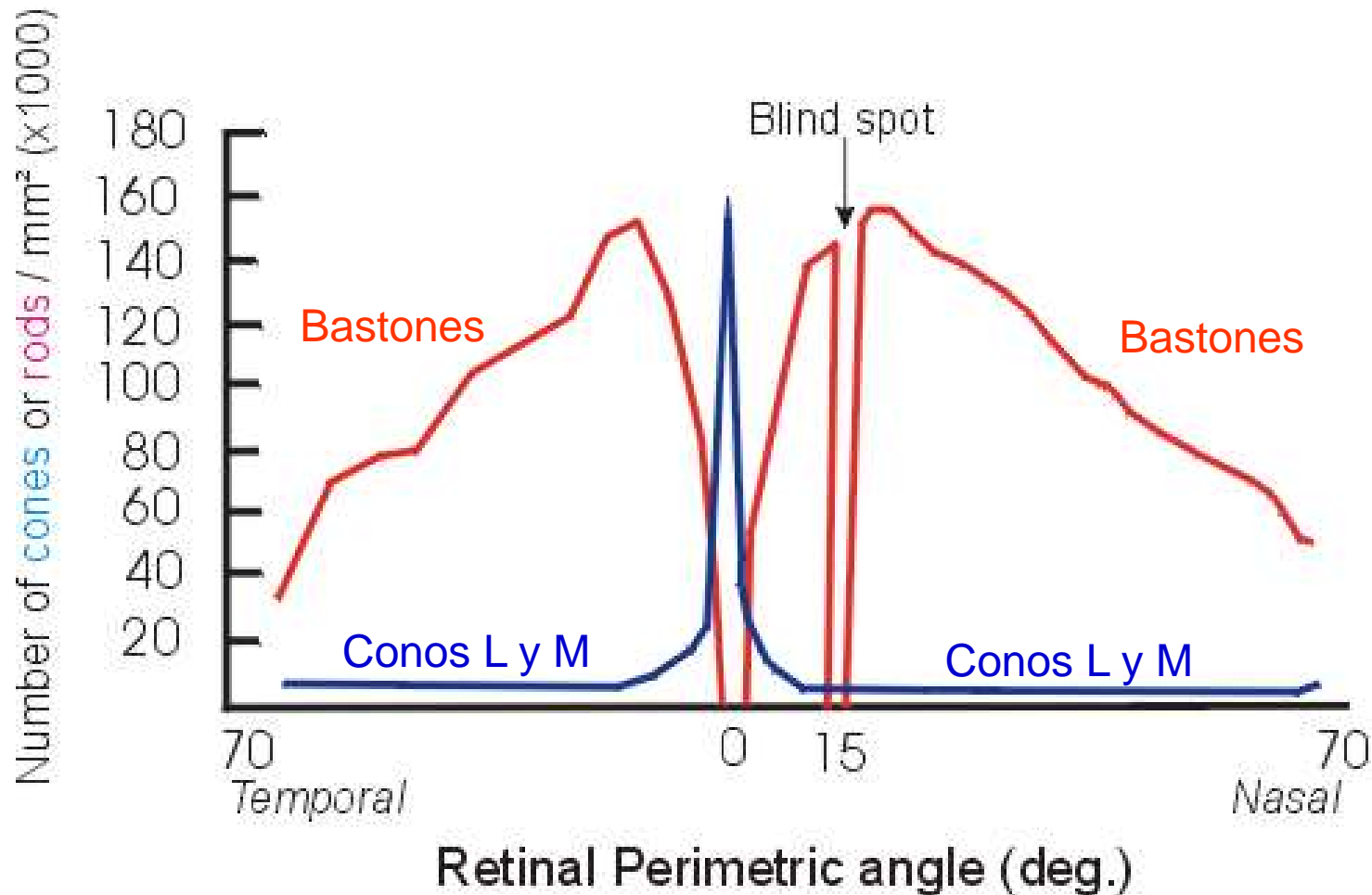
Posiciones de la retina referenciadas respecto a la fóvea







# Distribución de bastones y conos M y L

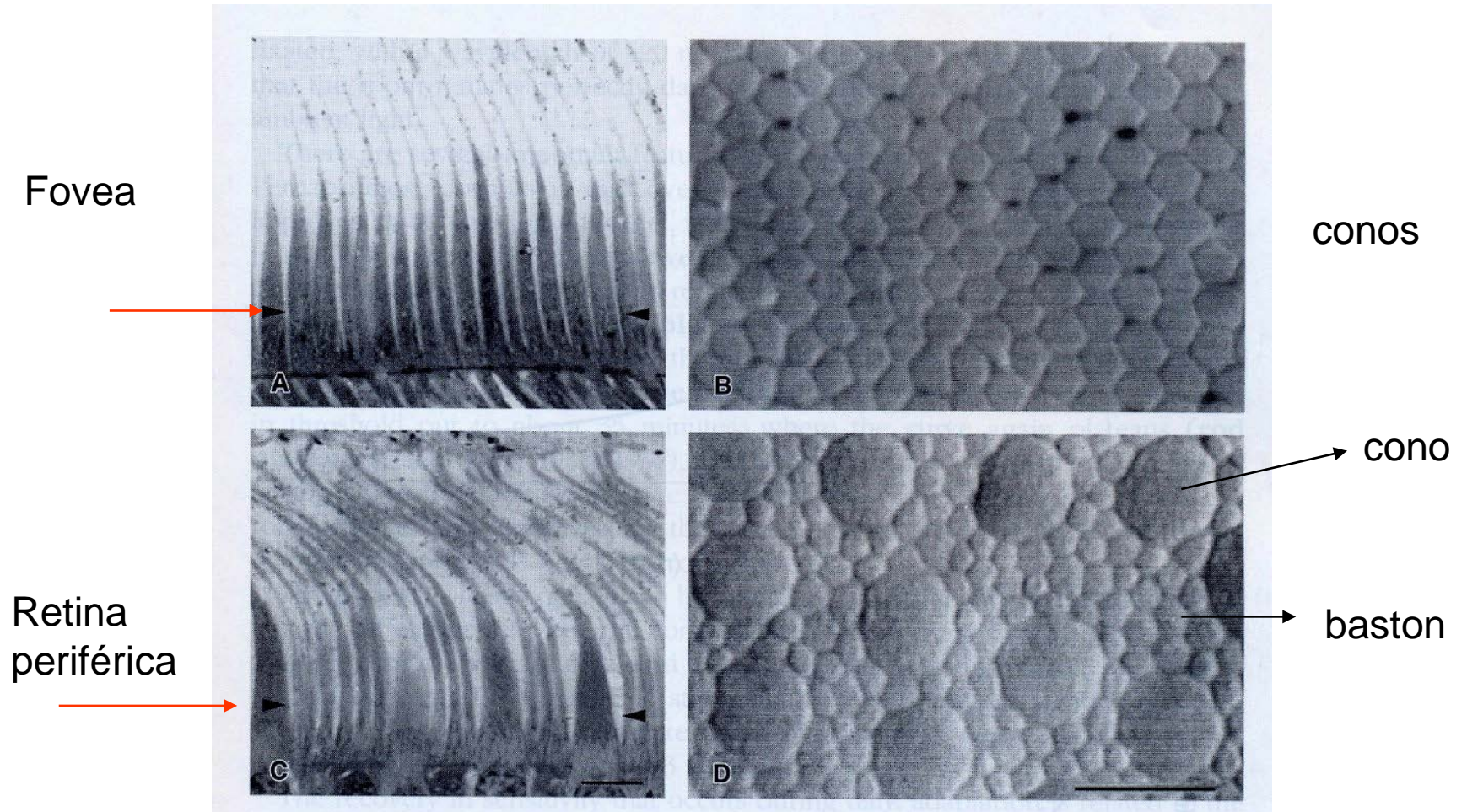


Adapted after Østerberg, 1935

# Distribución de conos

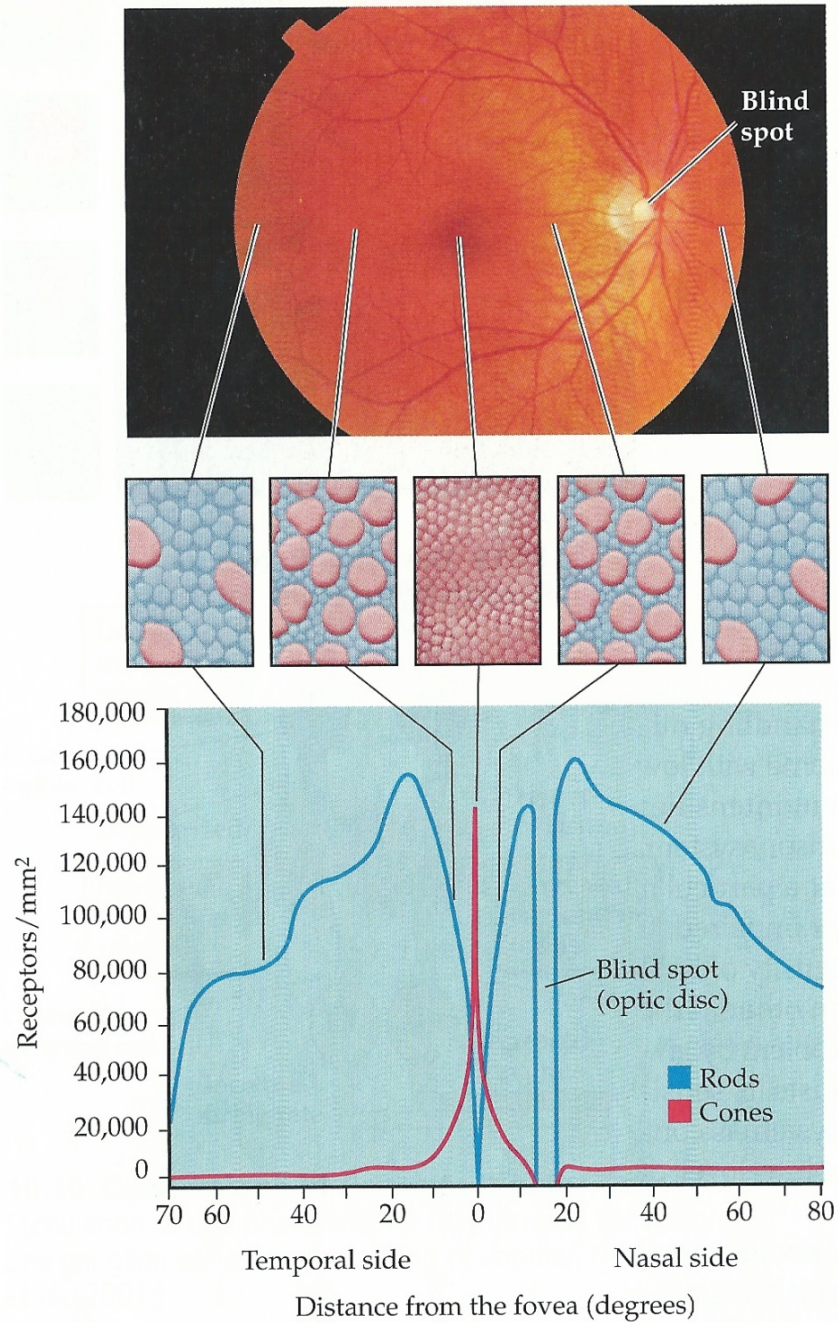
- Mayor densidad de conos en el centro de la fovea
  - 160,000/mm<sup>2</sup>
- Número total de conos en la fovea
  - Aproximadamente 200.000
  - < 4% del total

# Fotorreceptores



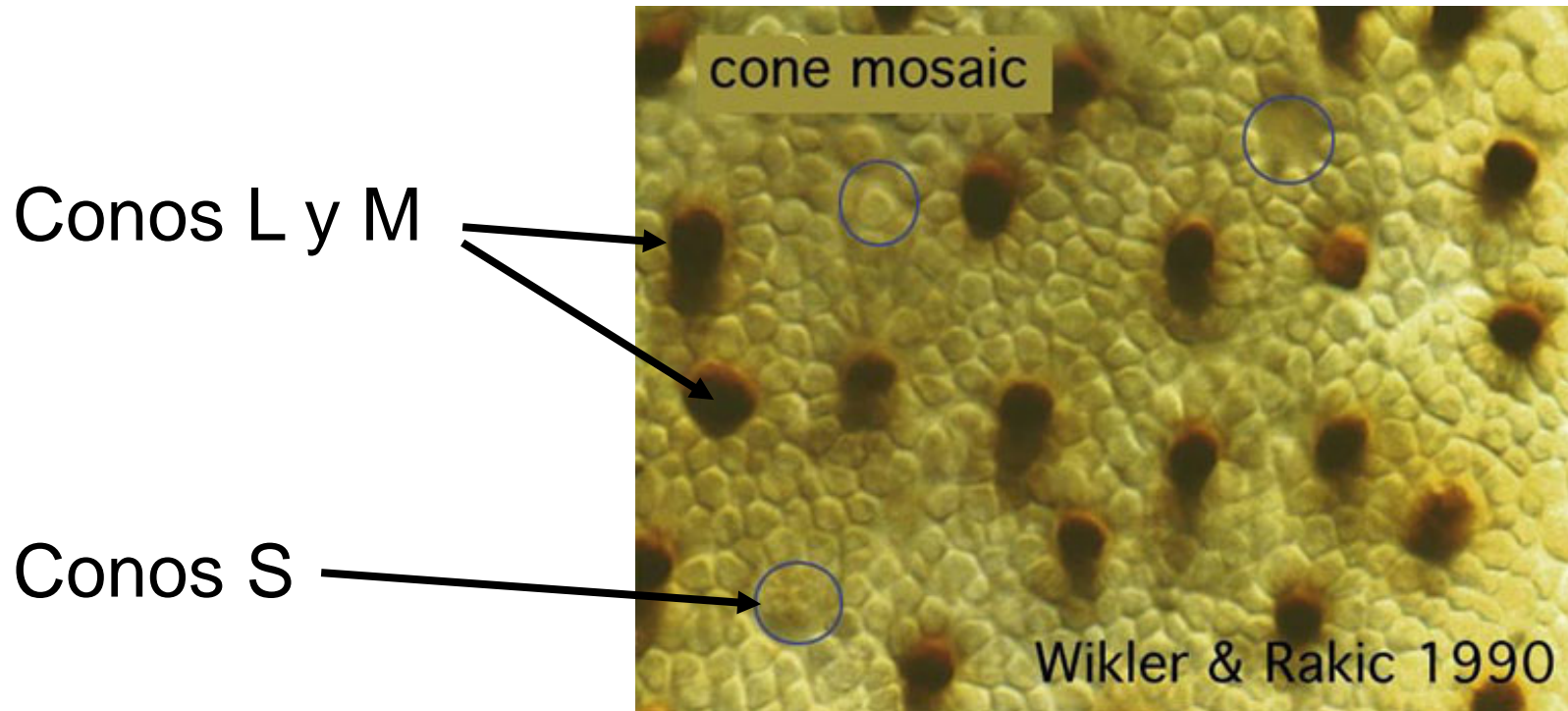


(a) Distributions of rods and cones across the retina



Percentage of acuity

# Mosaico de conos foveales



Menos conos S que conos L y M  $(L + M) / S = 100 / 1$

# Características diferenciales fotorreceptores

---

## BASTONES

Más fotopigmentos

Respuesta lenta: integración en el tiempo larga

Gran amplificación, detección de un solo fotón.

No tienen selectividad direccional a la luz

Respuesta saturada

Caminos retinianos altamente convergentes.

Sensibilidad luminosa alta

Agudeza visual baja

Adaptación a la oscuridad lenta

Acromáticos: un solo tipo de pigmento.

## CONOS

Menos fotopigmentos

Respuesta rápida: tiempo de integración corto

Probablemente menos amplificación

Selectividad direccional

Respuesta no saturada

Vías retinianas menos convergentes

Sensibilidad luminosa baja

Agudeza elevada

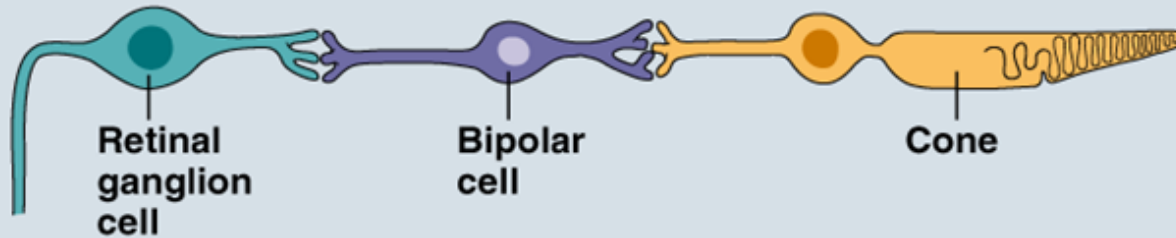
Adaptación a la oscuridad rápida

Cromáticos: 3 tipos de pigmentos

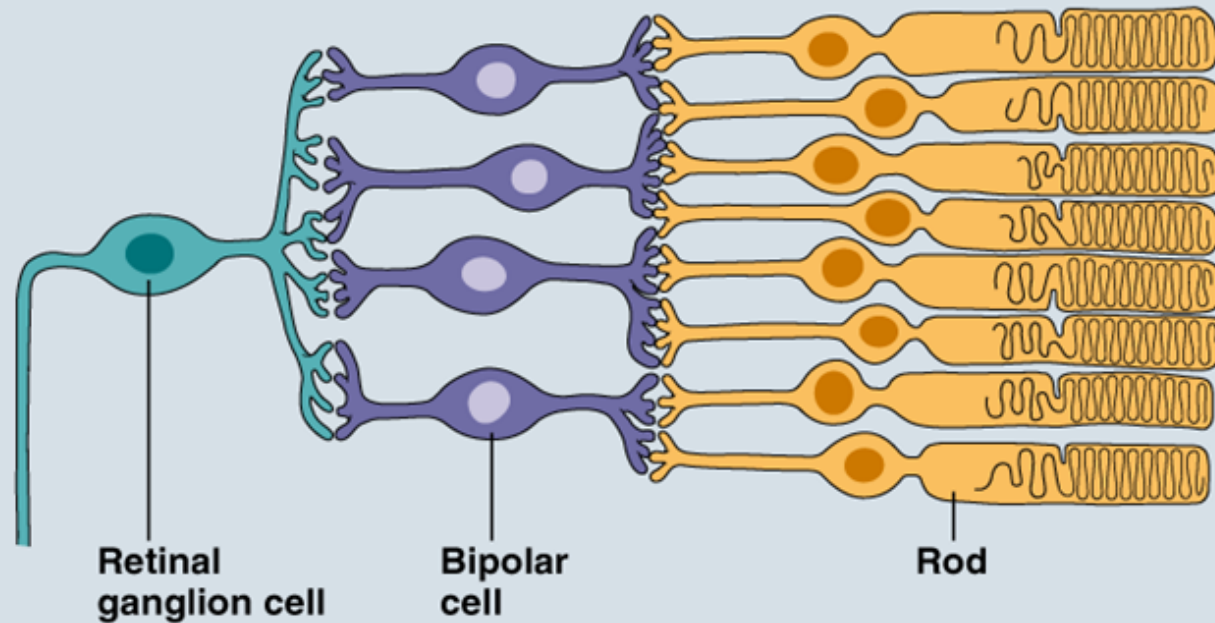
---

# Convergencia de las vías de conos y bastones

**Low Convergence in Cone-Fed Circuits**



**High Convergence in Rod-Fed Circuits**





# Sistema de conos y bastones

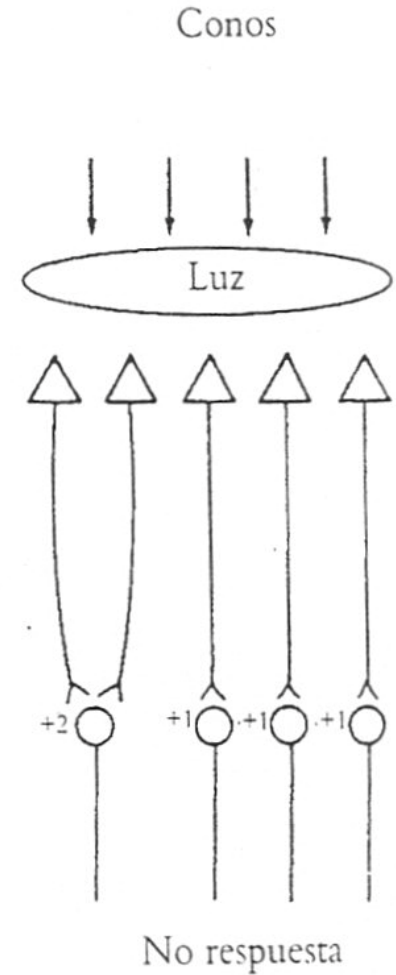
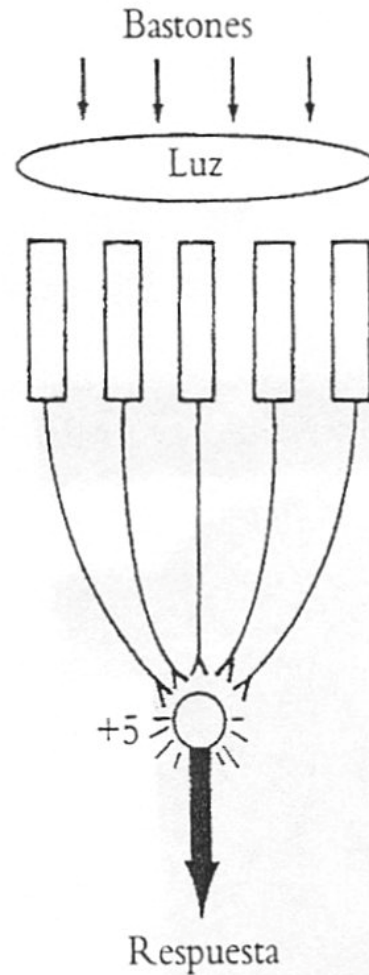
Sensibilidad luminosa

Ratio

Fotorreceptor / C. ganglionar

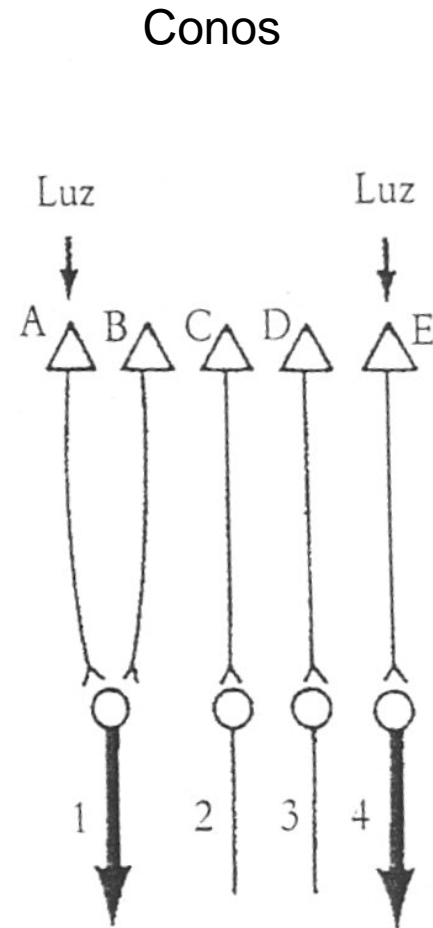
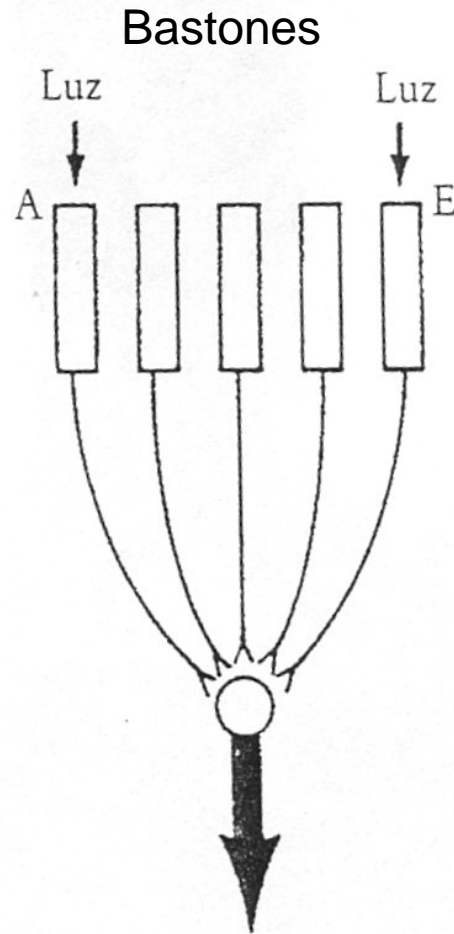
Fóvea: 3/1

Total retina: 125/1

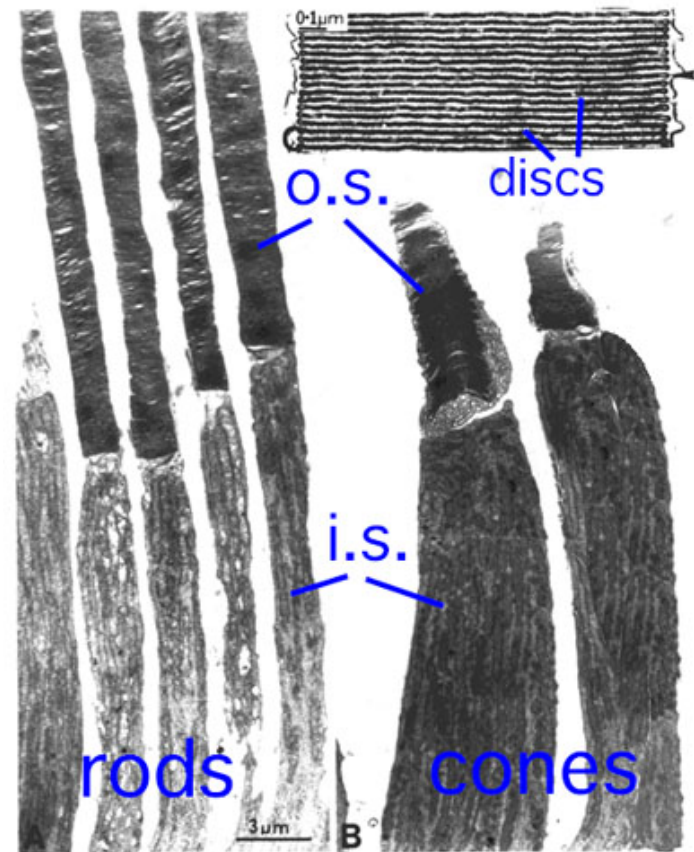
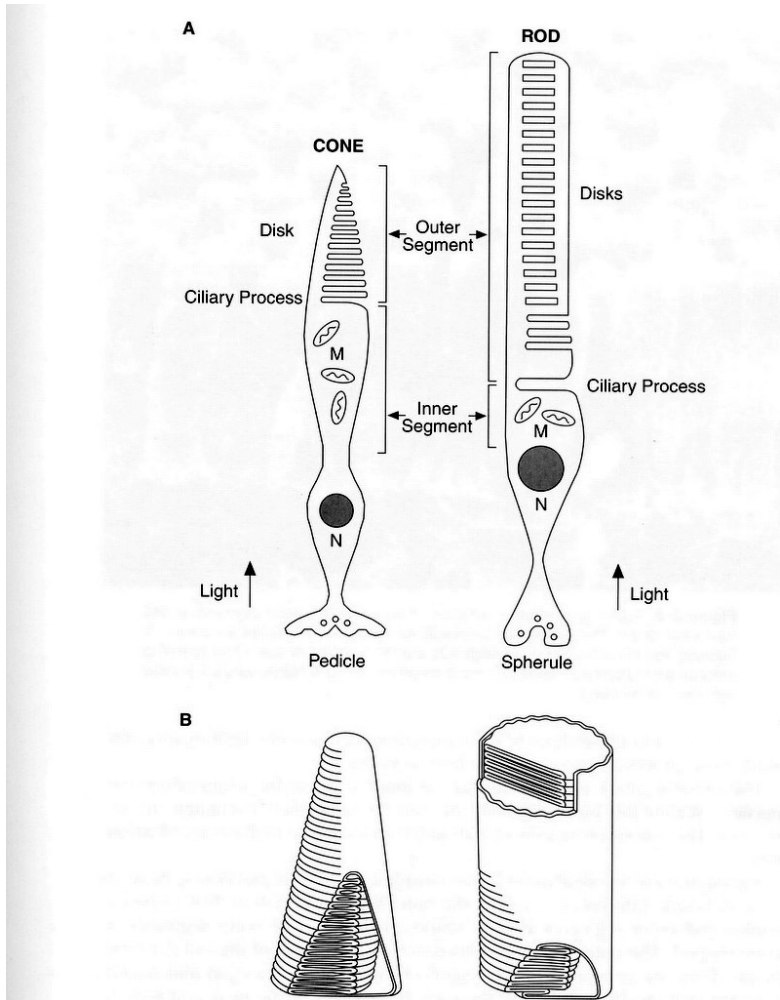


# Sistema de conos y bastones

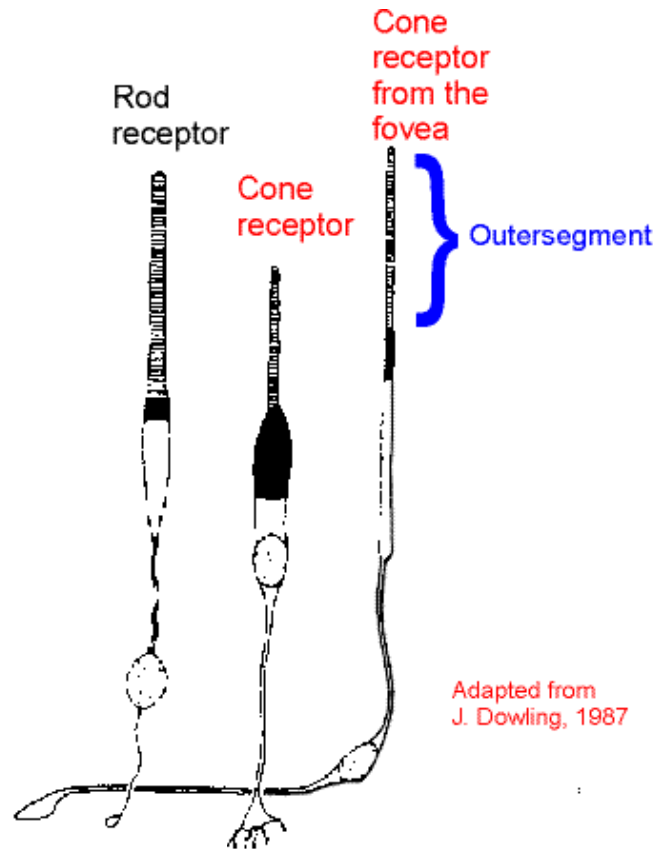
## Resolución espacial



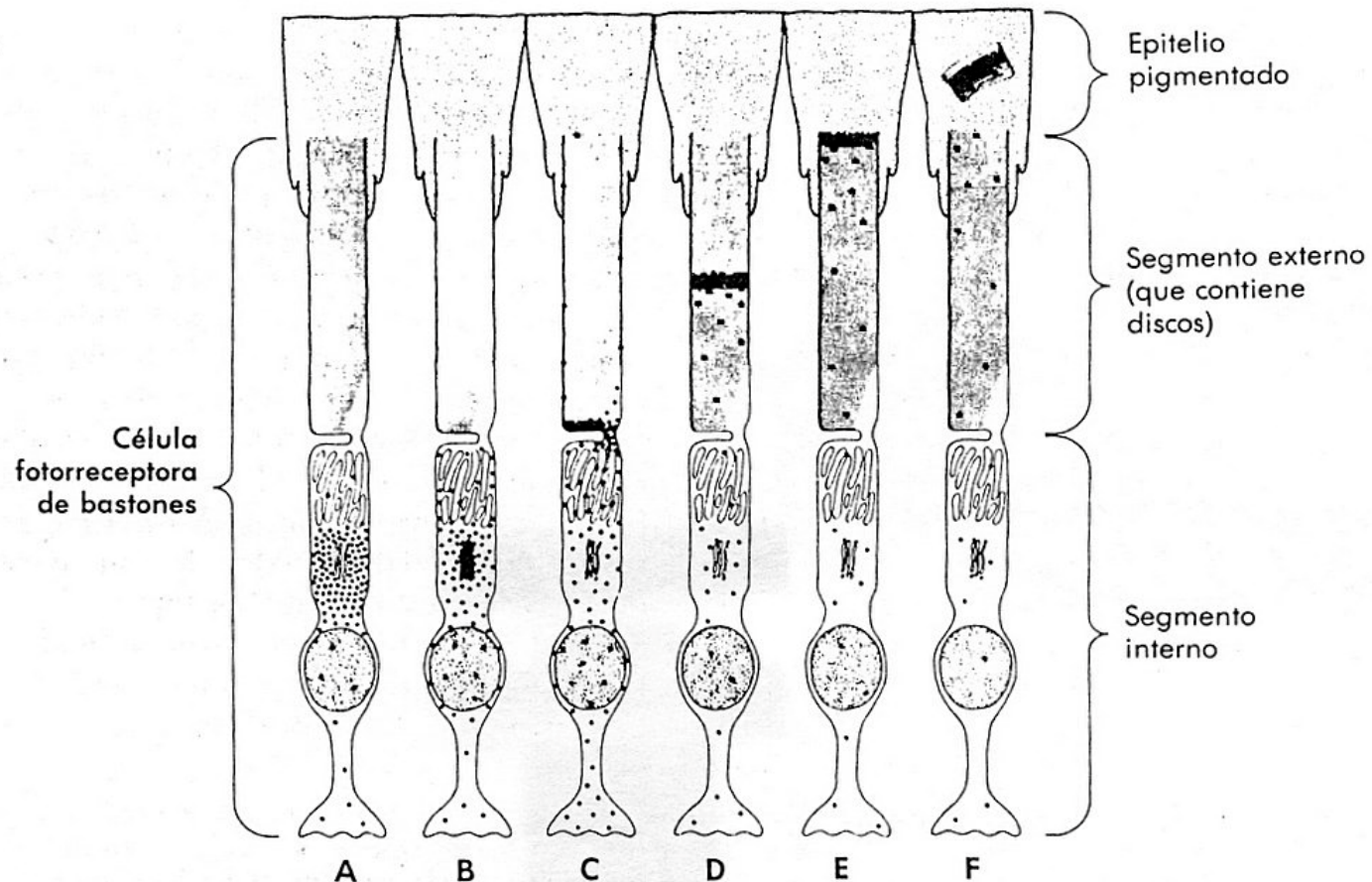
# Diferencias en estructura y función entre los bastones y los conos



# Diferencias en estructura y función entre los bastones y los conos



# Eliminación y regeneración de los segmentos externos de los fotorreceptores



Los discos se producen y se desprenden con una tasa aproximada del 10% por día.

Los discos de bastones suelen eliminarse durante el día y los de conos durante la noche.

# Fotopigmentos en la retina humana

<u>Opsina</u>		<u>Retinal</u>
Escotopsina	+	11-cis-retinal-----RODOPSINA (máx=500 nm)
Eritropsina	+	11-cis-retinal-----ERITROLABE (máx=570 nm)
Cloropsina	+	11-cis-retinal-----CLOROLABE (máx=535 nm)
Cianopsina	+	11-cis-retinal-----CIANOLABE (máx=420 nm)

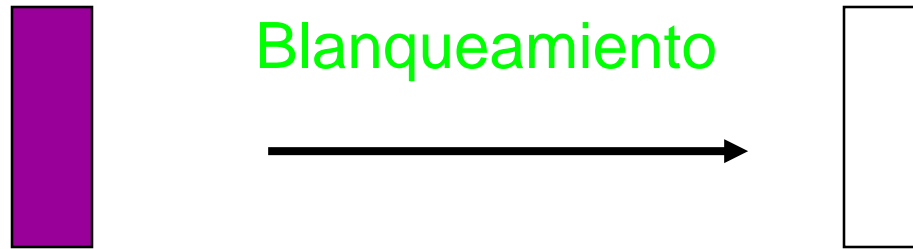
# Pigmentos de los bastones: rodopsina

RODOPSINA (purpura visual).

Cada disco contiene alrededor de 10.000 moléculas  
x 1000 discos por baston x 120 millones de bastones =  
 $10^{15}$  moléculas de rodopsina por ojo

# Pigmentos de los bastones: rodopsina

La rodopsina (color púrpura) **se blanquea** (transparente) cuando se expone o absorbe luz



Un solo fotón de luz es suficiente para blanquear una molécula de rodopsina

Cuando la molécula está en un estado blanqueado, no es capaz de capturar otro fotón



# Pigmentos de los bastones: rodopsina

Una molécula blanqueada revertirá espontáneamente al estado sin blanquear



La probabilidad de este suceso en 5 minutos es de 0.50

Vida-media de regeneración

# Pigmentos de los bastones: rodopsina

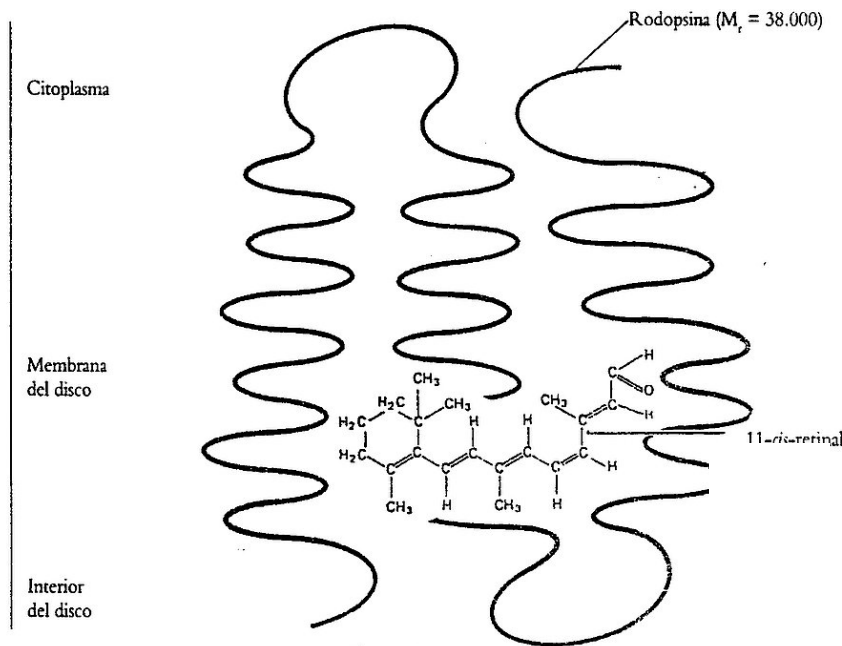
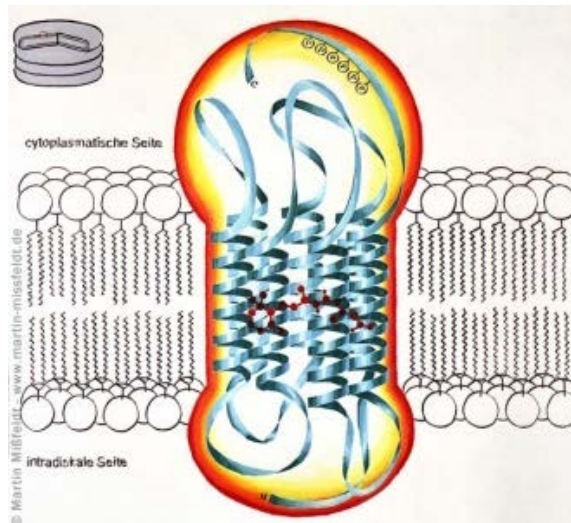
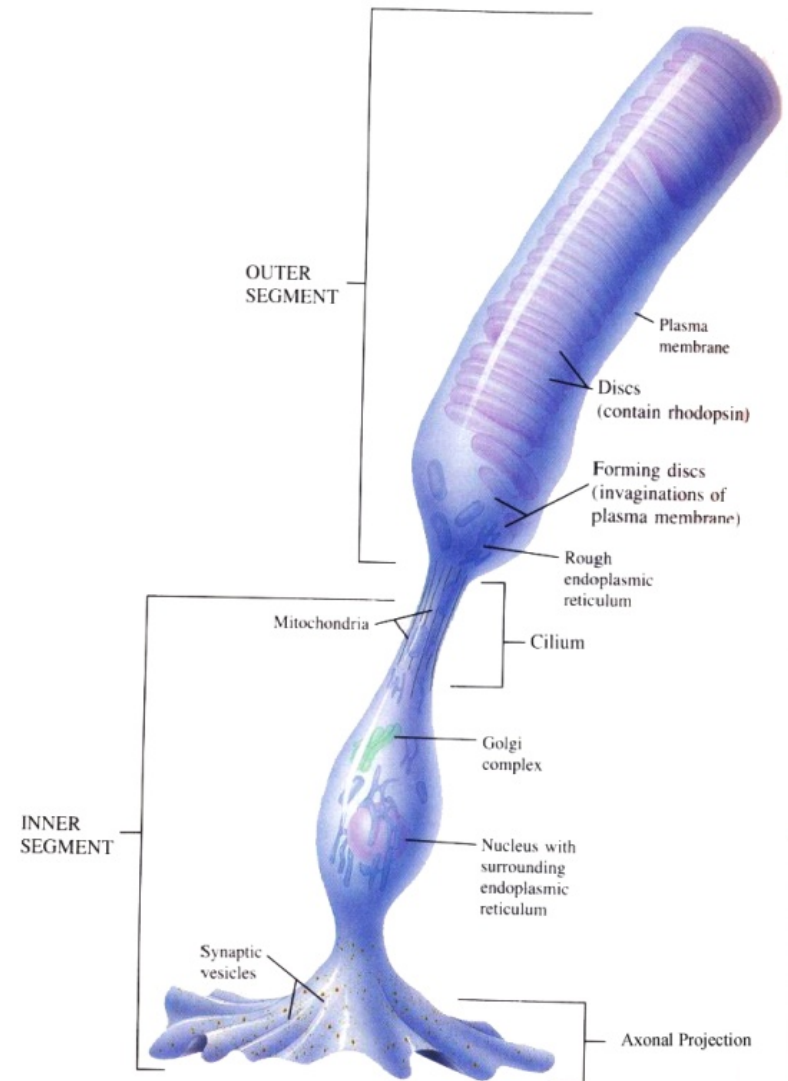
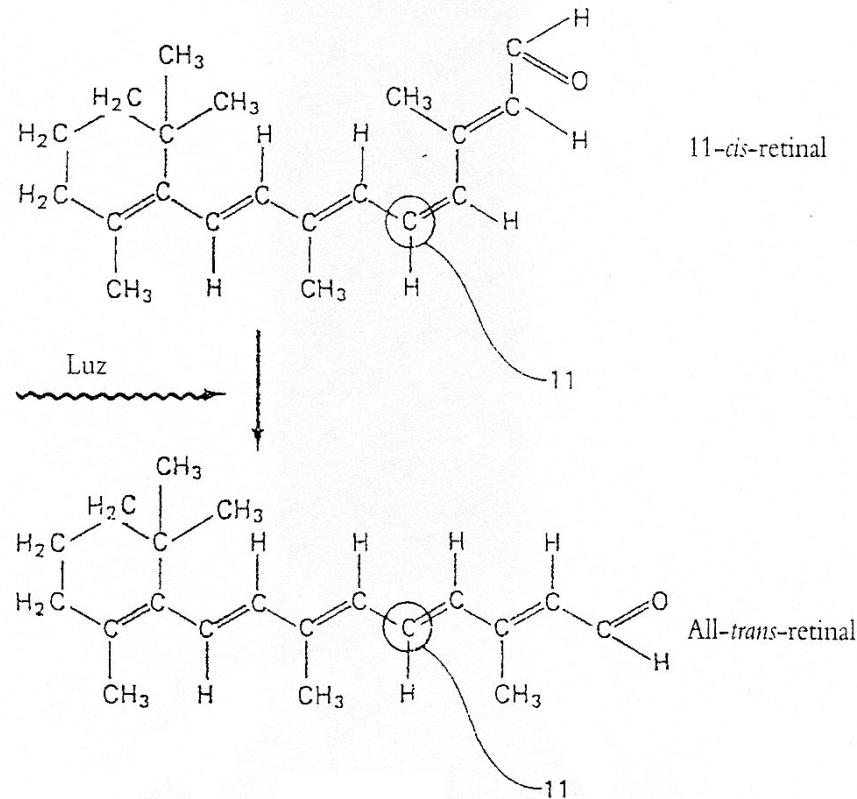


Figura 6

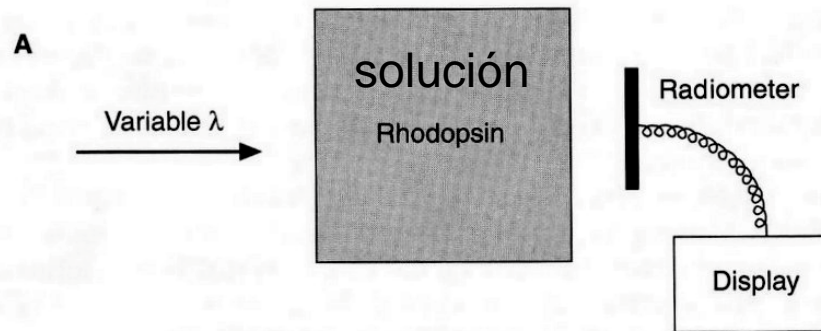


# Fotoisomerización: cambio de conformación



# Curva de absorción espectral de la rodopsina

Medida de la transmitancia ( $\lambda$ )



Transmitancia ( $\lambda$ ) =  $I$  transmitida /  $I$  incidente

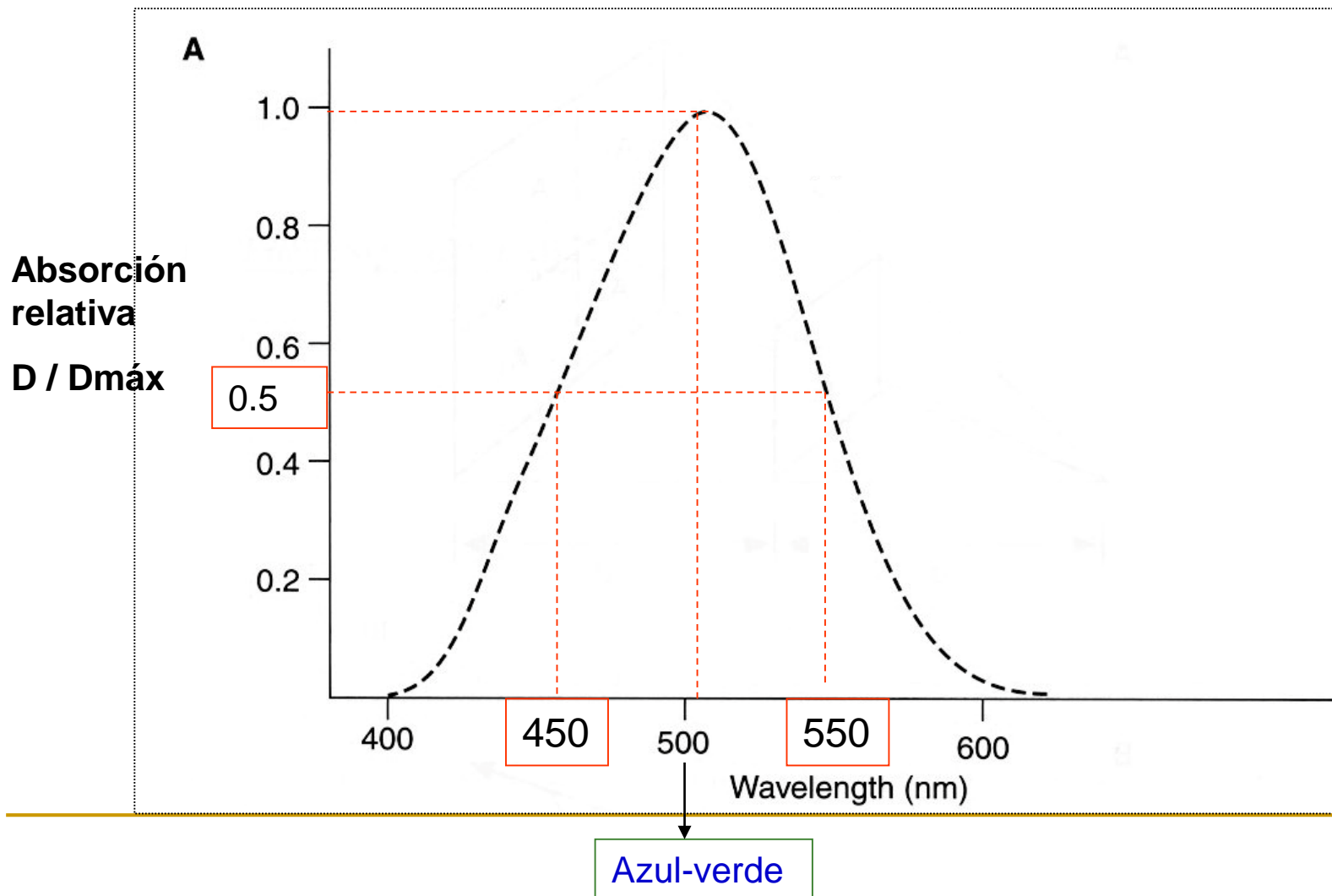
La absorción se mide mediante la densidad óptica:  $D = \log (1/T)$ .

Cuando toda la luz es transmitida  $T = 1$  y  $D = 0$

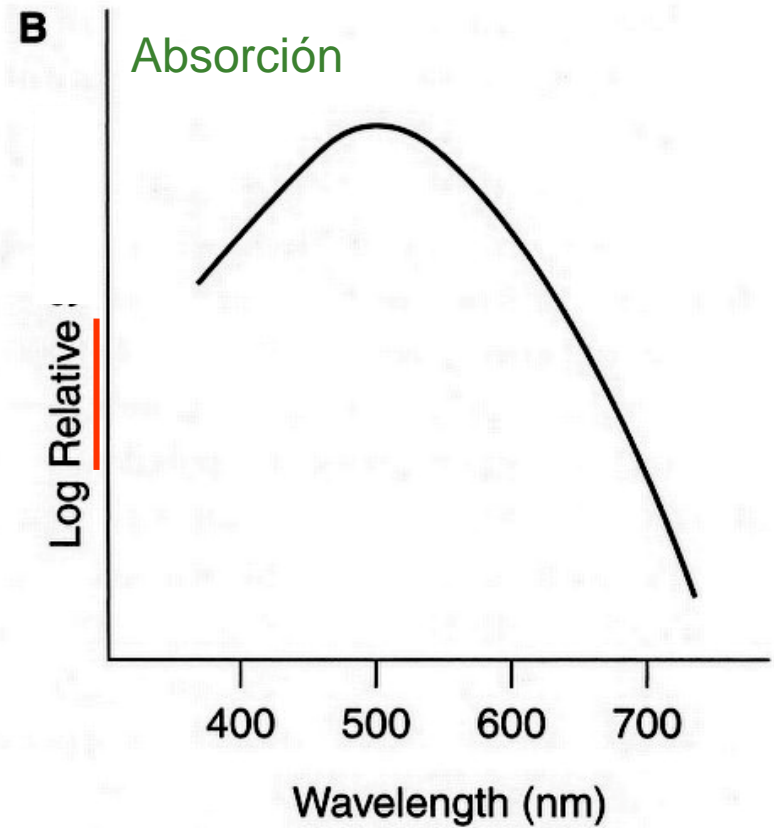
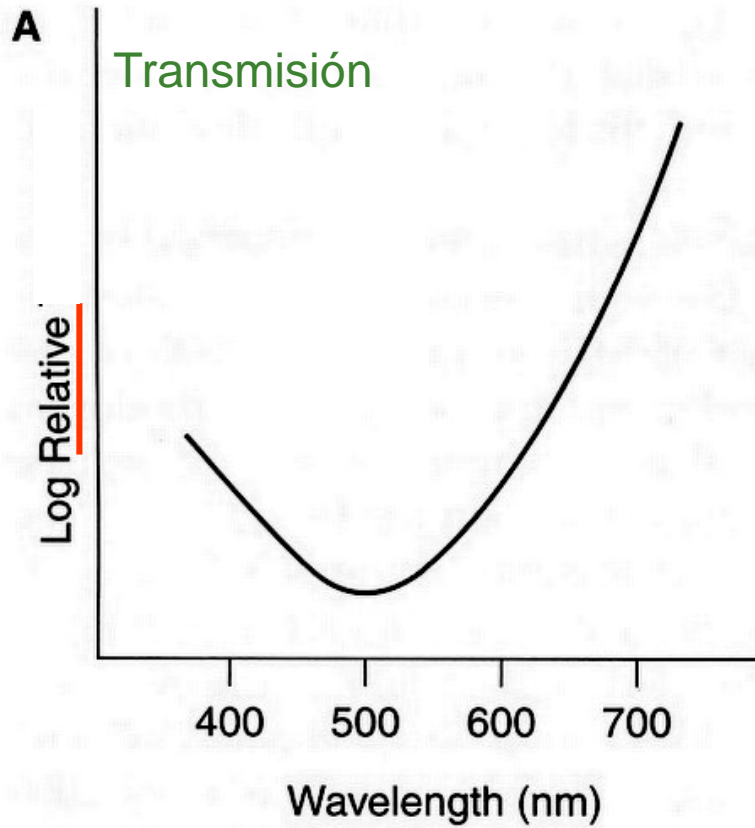
Cuando  $T = 0$  entonces  $D = \infty$

Transmitancia espectral para la rodopsina ( $\lambda$ ) =  $I$  transmitida a través de la solución de rodopsina /  $I$  transmitida a través del solvente solo

# Curva de absorción espectral de la rodopsina



# Curva de absorción espectral de la rodopsina



# Absorción espectral de la rodopsina

Efecto de 1000 fotones de 507 nm y 1000 fotones de 580 nm  
que inciden en un recipiente de rodopsina

Probabilidad de absorción de 1 fotón de 507 nm: 0,20

Probabilidad de absorción de 1 fotón de 580 nm: 0,10

**1000 fotones de 507 nm blanquearán ( $1000 \times 0,2$ ) 200 moléculas de rodopsina**

**1000 fotones de 580 nm blanquearán ( $1000 \times 0,1$ ) 100 moléculas de rodopsina**

**2000 fotones de 580 nm blanquearán ( $2000 \times 0,1$ ) 200 moléculas de rodopsina**

## *Principio de univariancia*

Una vez que un fotón de luz se absorbe, toda la información con respecto a su longitud de onda se pierde

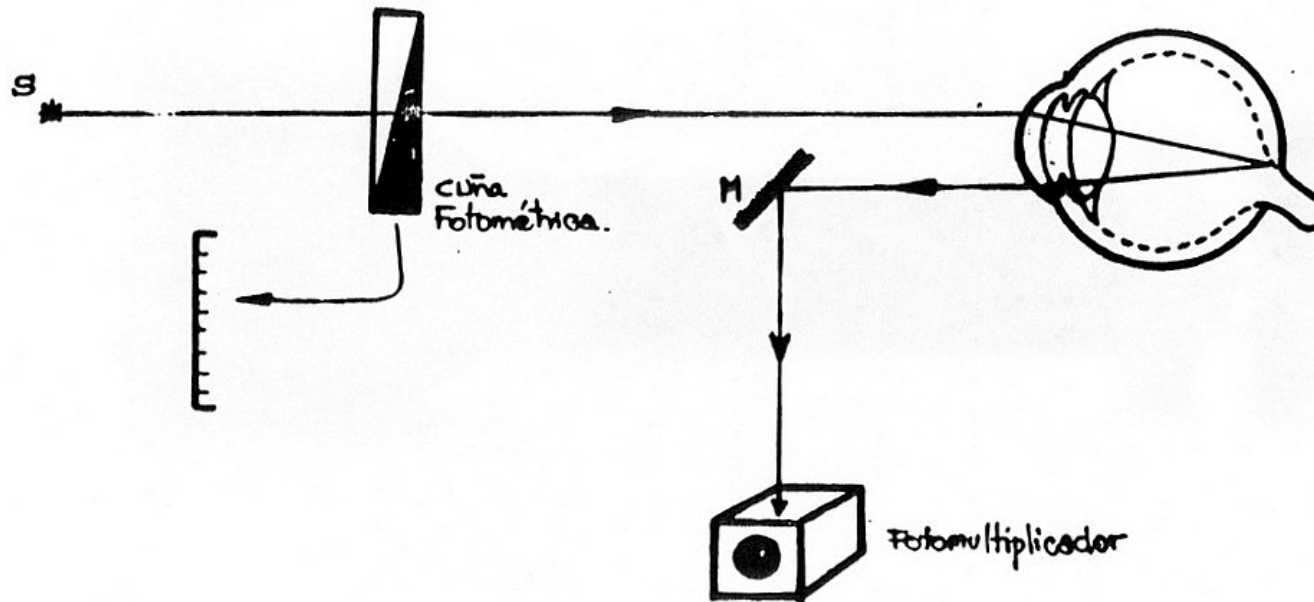
# Pigmentos de los conos

- Técnica de la reflectodensitometría  
(densitometría de reflexión retiniana )
- Técnica de la microespectrofotometría



# Reflectodensitometría de fondo de ojo

Técnica no invasiva para examinar el fotorpigmento visual en ojos vivos.



Esquema de la técnica de la reflecto-densimetria de Rushton

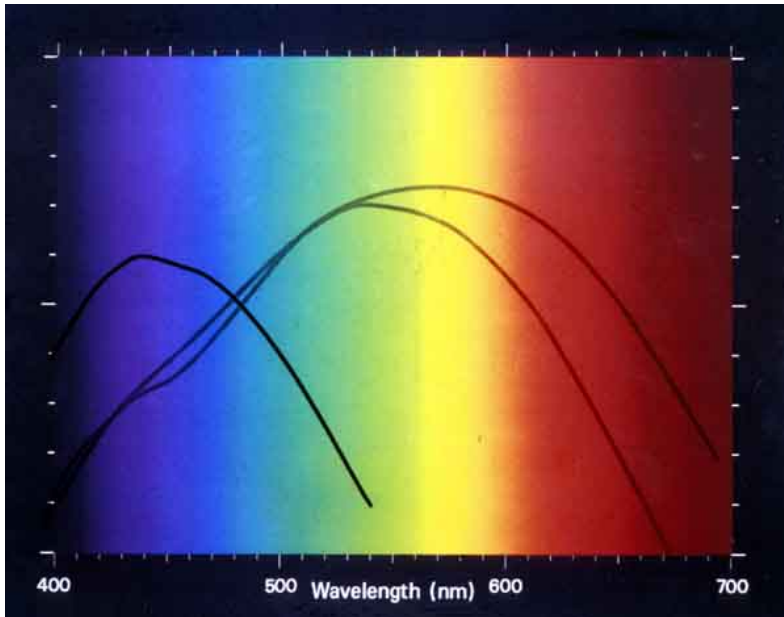
# Reflectodensitometría

- Fóvea: pigmento eritrolabe y clorolabe
- Sujetos del experimento:
  - Dicrómatas que carecían de pigmento sensible al rojo (protanopes)
    - fóvea: espectro de absorción máximo 540 nm (CLOROLABE).
  - Dicrómatas que carecían de pigmentos sensibles al verde (deuteranopes)
    - fóvea: espectro de absorción máximo 570 nm (ERITROLABE)

# Microespectrofotometría

- Proyección de un mini fascículo de luz sobre un cono foveal situado en el microcopio.
- Curva de absorción espectral del pigmento
  - Espectro diferencia entre la luz detectada después de atravesar el segmento externo del FR y después de atravesar un área adyacente vacía.

# Absorción espectral pigmentos de los conos



Conos L y M (rango: 450 – 620 nm)

Conos S (rango: 370 – 530 nm)

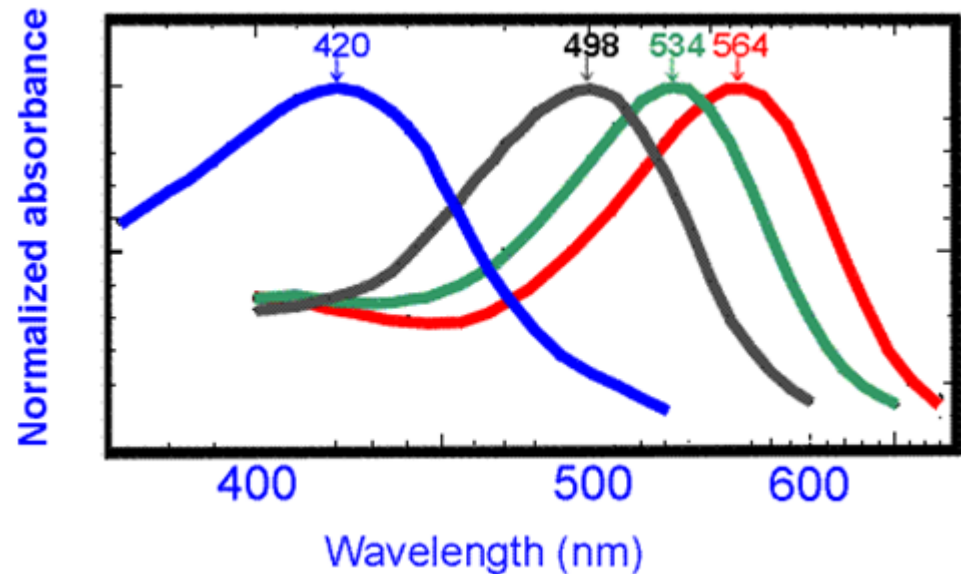
Conos S sensibles a  $\lambda$  cortas, máx 420 nm (azul)

Conos M sensibles a  $\lambda$  medias, máx 535 nm (amarillo-verde)

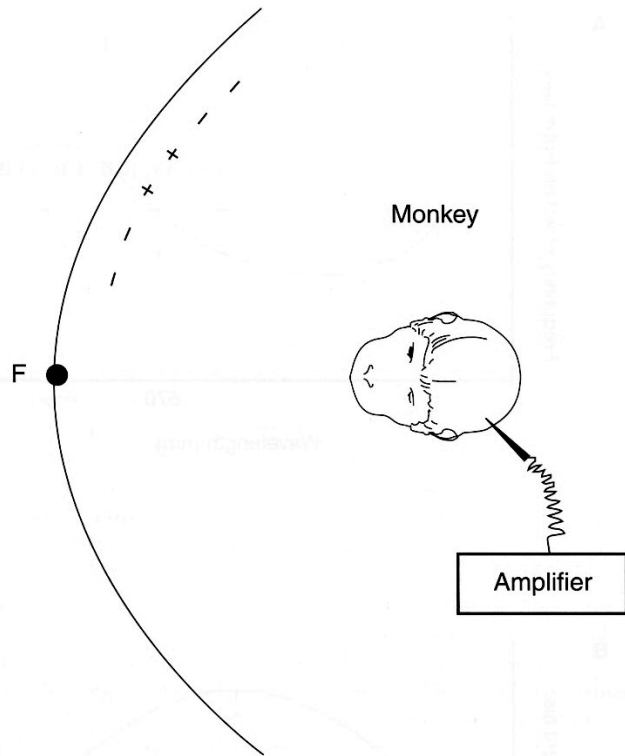
Conos L sensibles a  $\lambda$  largas, máx 565 nm (amarillo)

## Pigmentos de conos

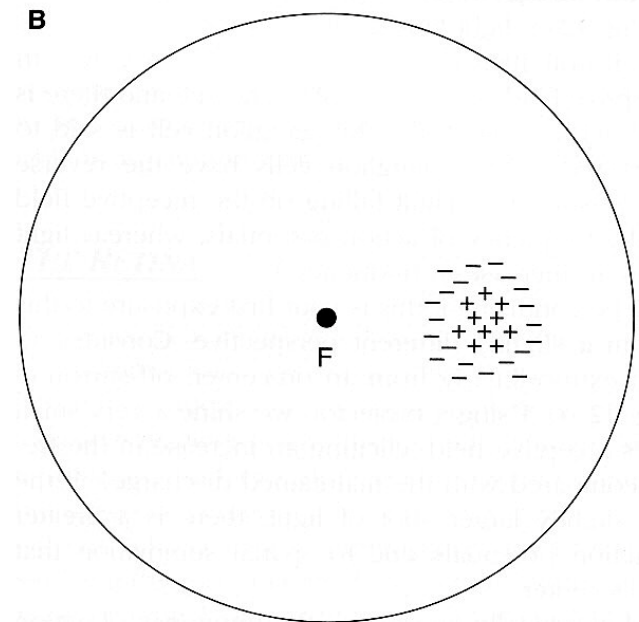
- Cianolabe (conos S)
- Clorolabe (conos M)
- Eritrolabe (conos L)



# Campo receptor (CR) de la célula ganglionar

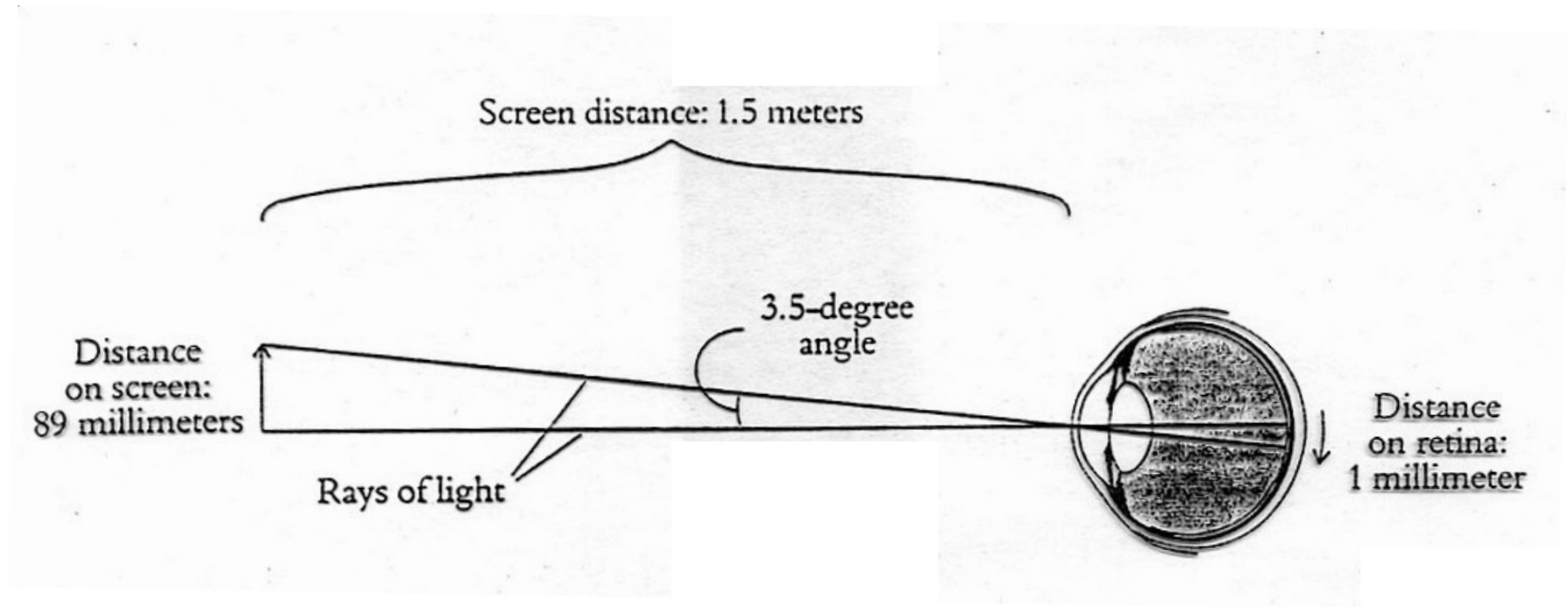


Determinación del CR de una sola célula ganglionar



Vista frontal de la pantalla y del CR

# Cálculo del tamaño del campo receptor

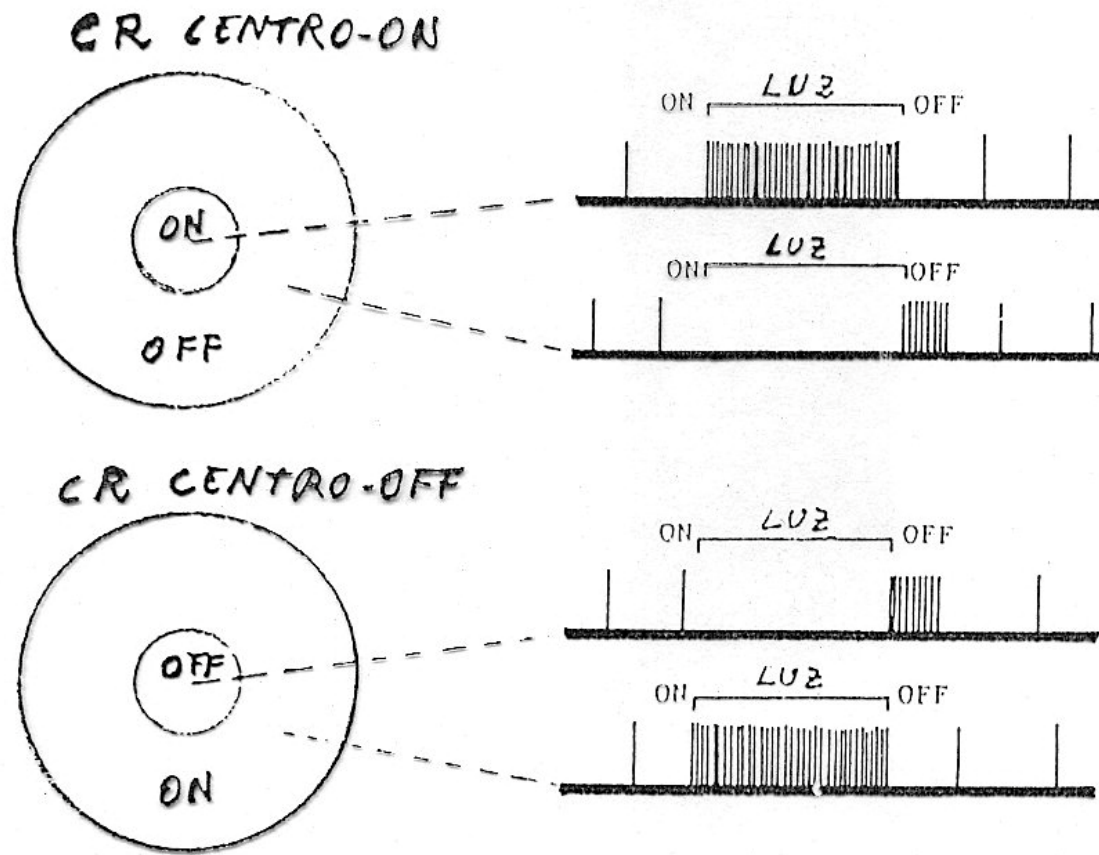


# Campo receptor de células ganglionares

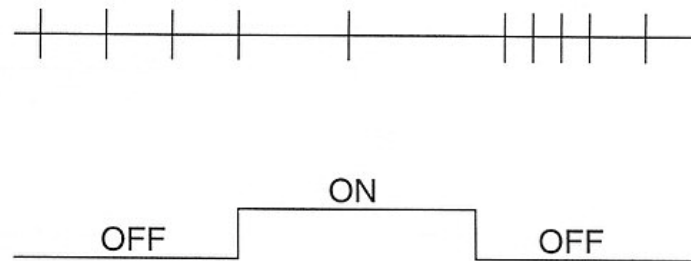
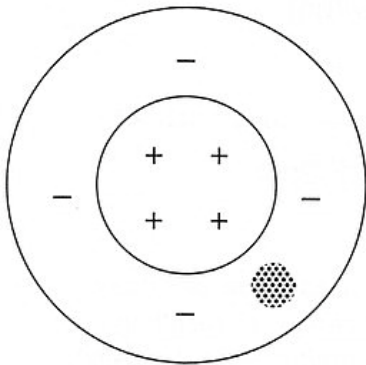
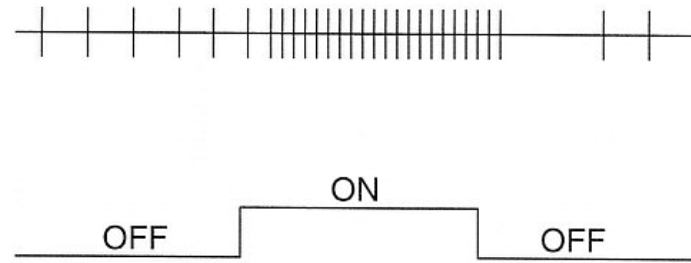
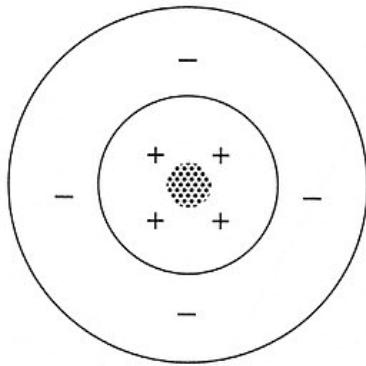
- El CR de una neurona individual es la región específica del campo visual en la cual un estímulo modificará el disparo (respuesta) de esa neurona.
  - ❑ Los CR de las áreas foveales son más pequeños que los de la periferia
  - ❑ Los CR de las neuronas son de forma circular.
  - ❑ Las neuronas son monoculares.
  - ❑ Muchas neuronas tienen CR con área excitatoria e inhibitoria.



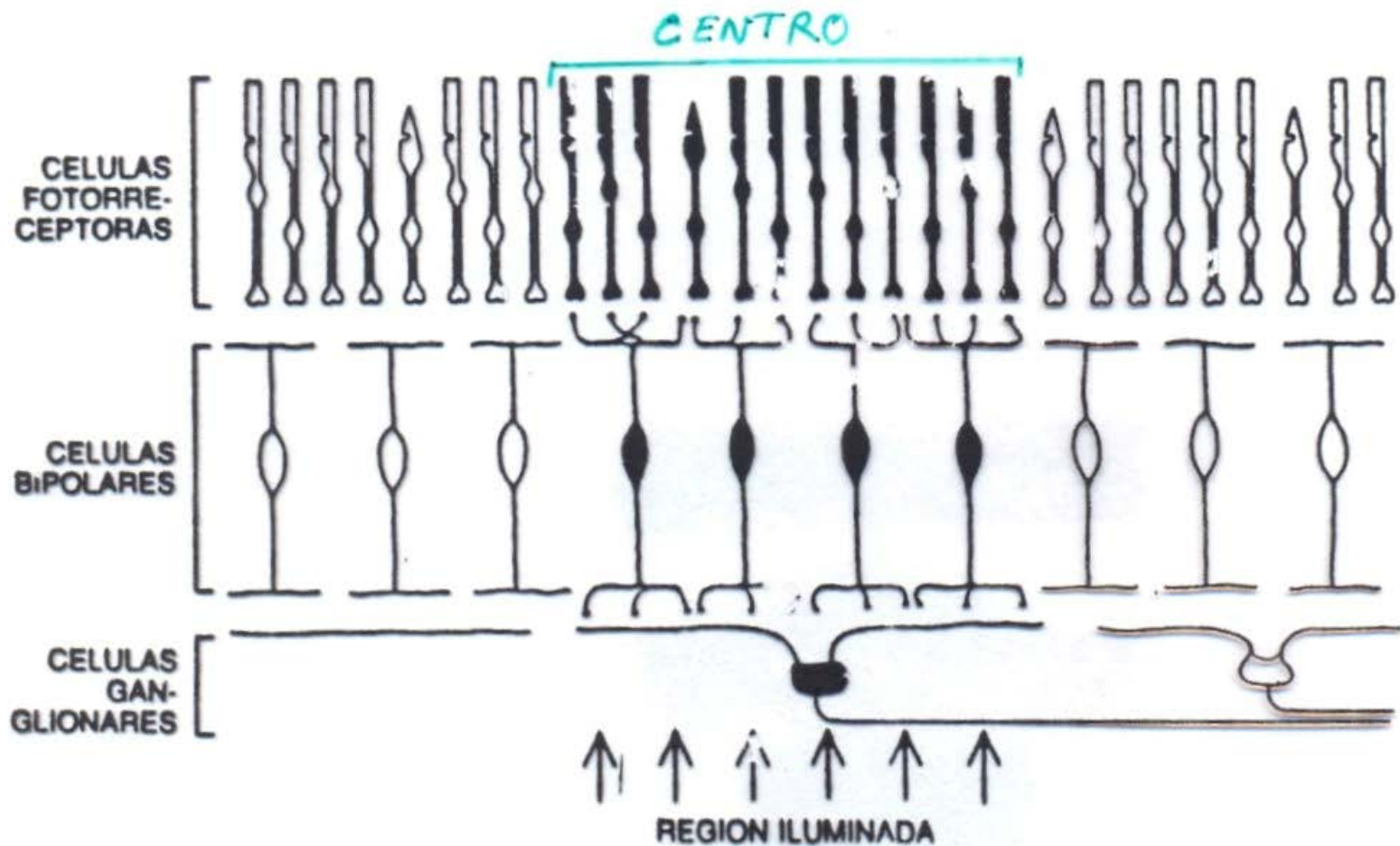
# Campo receptor de centro-ON y de centro-OFF de la célula ganglionar

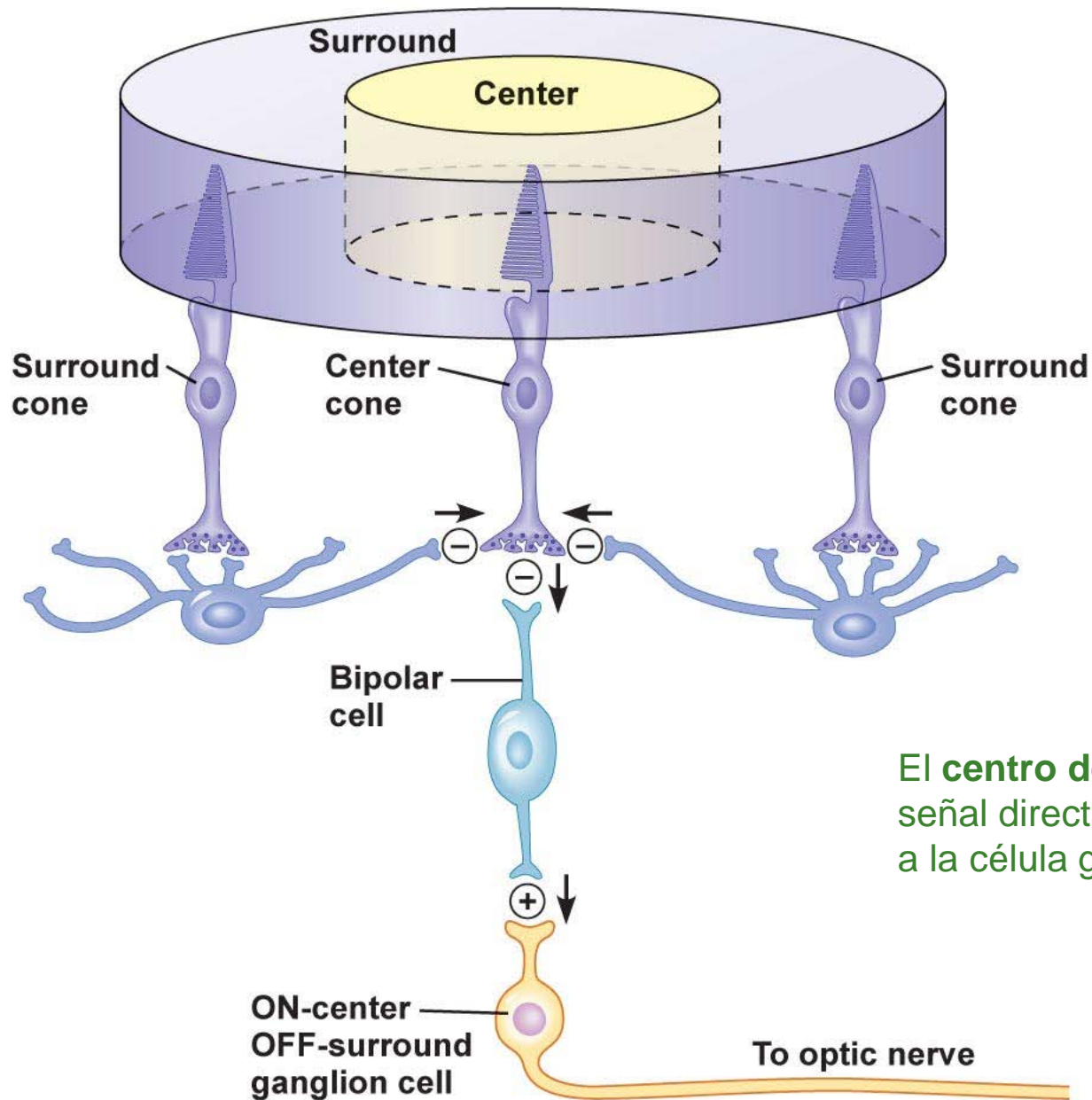


# Campo receptor de centro-ON (ganglionar)



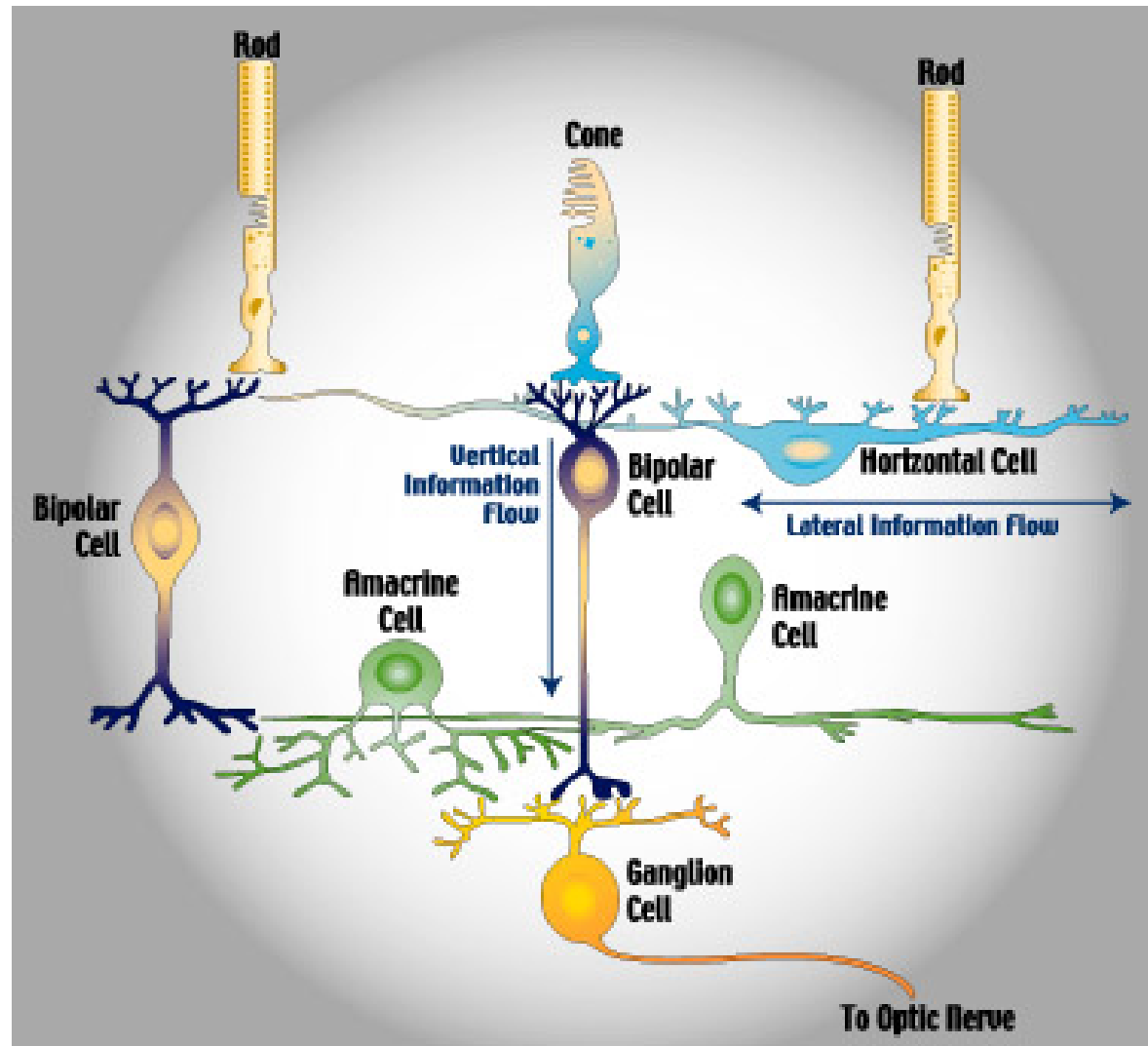
# Organización funcional de la zona central y periférica del CR de la célula ganglionar en la retina



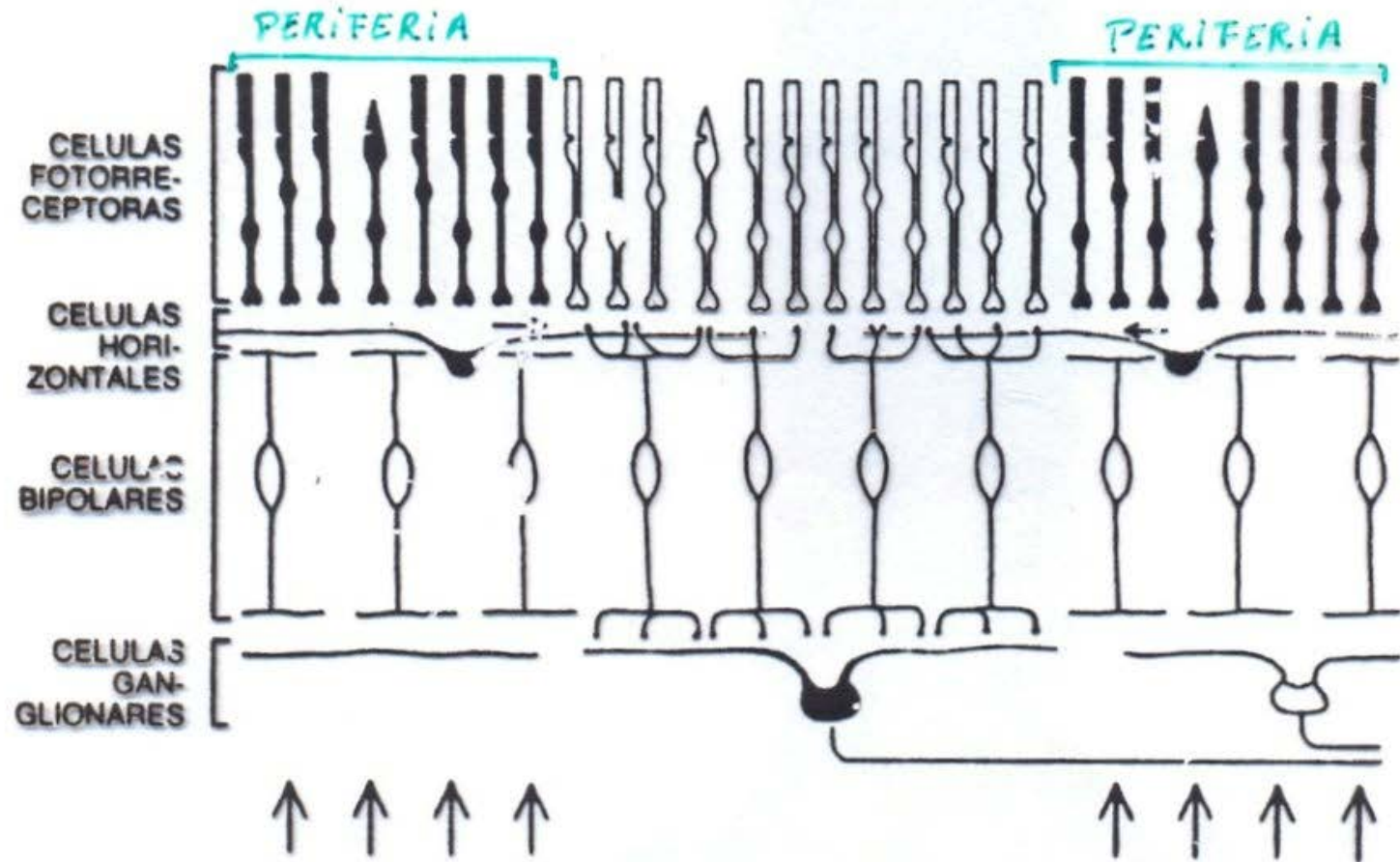


El **centro del CR** proporciona una señal directa de los fotorreceptores a la célula ganglionar

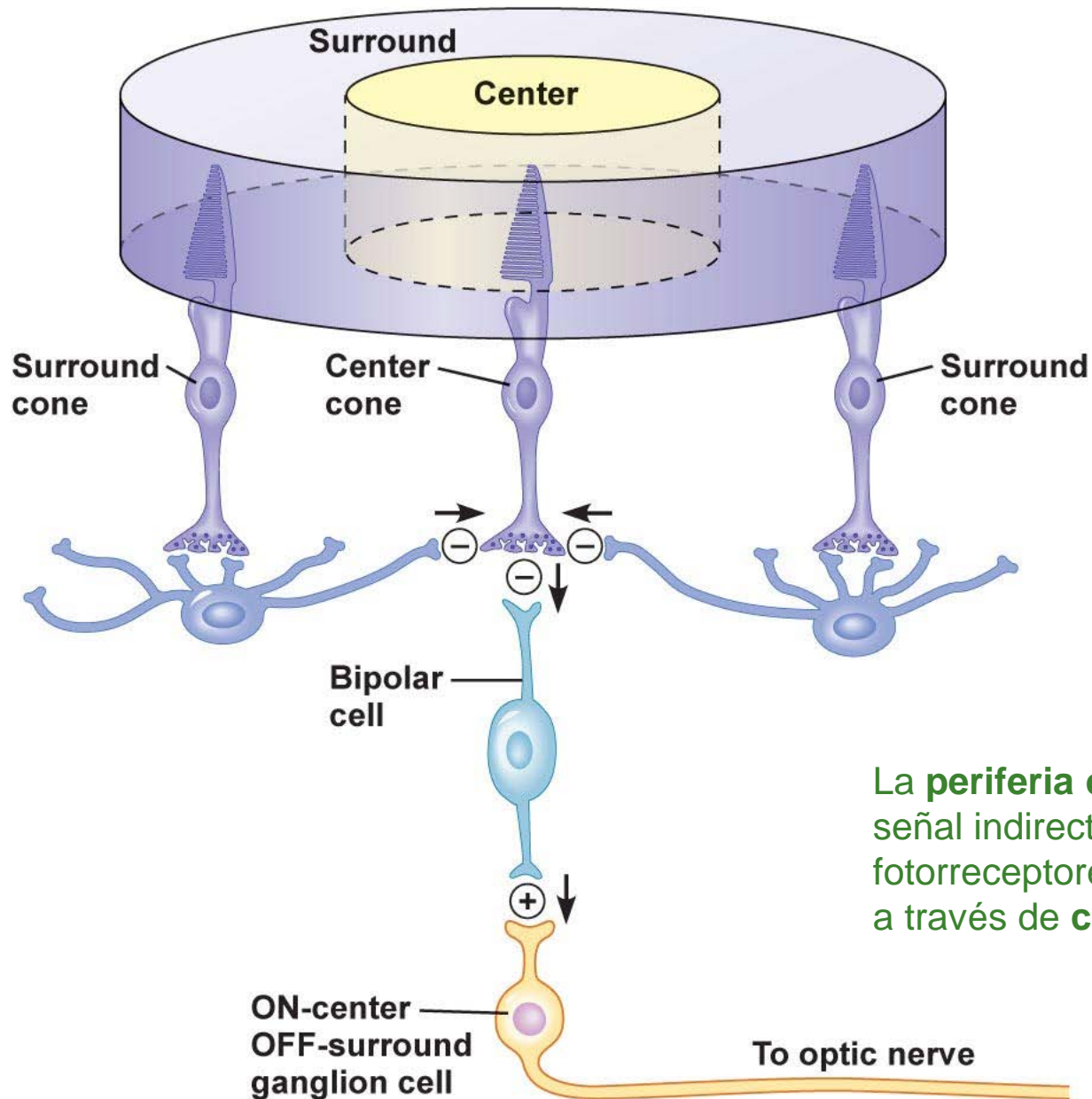
# Flujo de información desde los FR hasta las ganglionares



# Organización funcional de la zona central y periférica del CR de la célula ganglionar en la retina



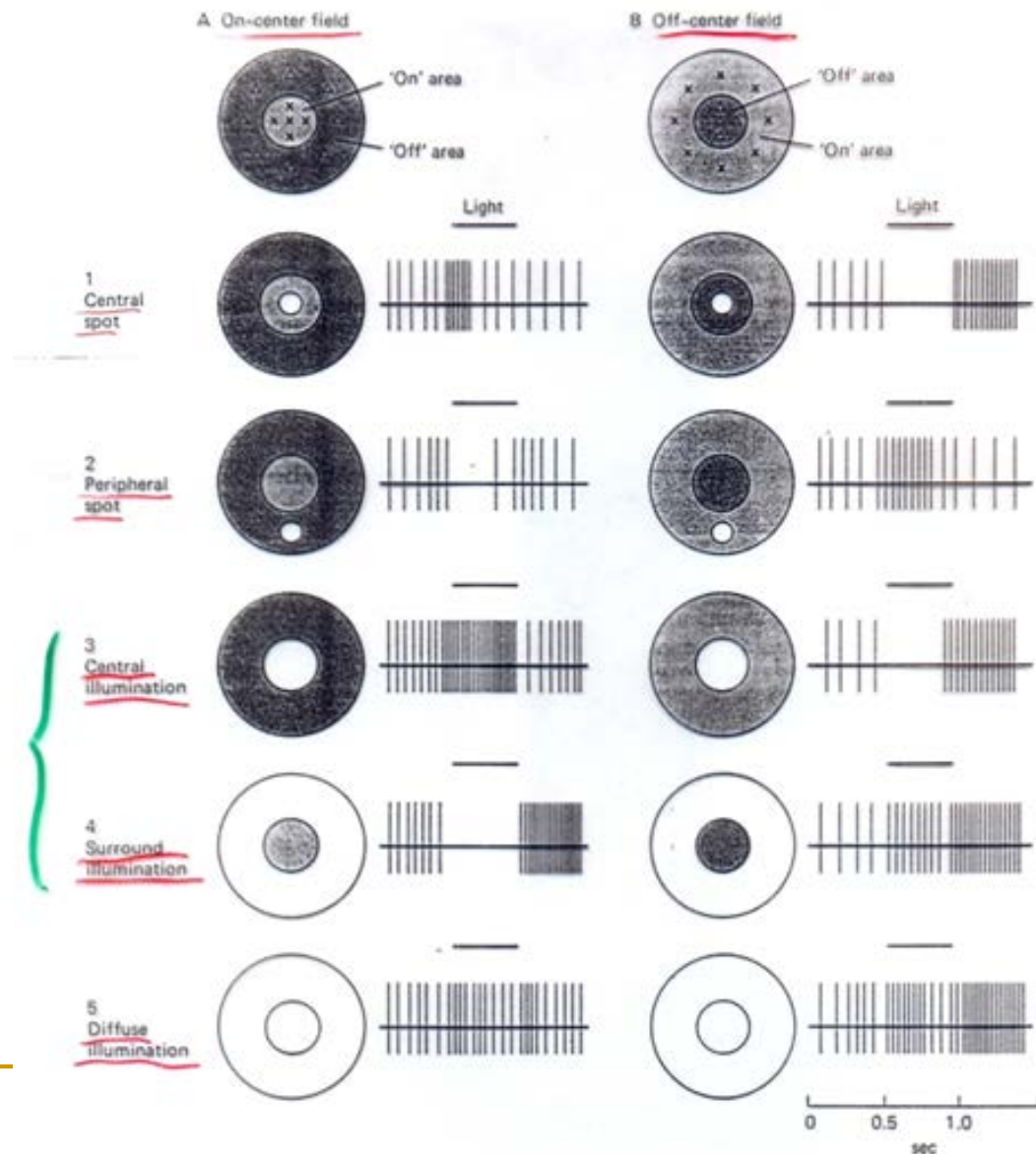




La **periferia del CR** proporciona una señal indirecta desde los fotorreceptores a la célula ganglionar a través de **células horizontales**



# Respuestas de la célula en función de la zona de incidencia de la luz





(a) An on-center/off-surround cell

Receptive field

Off-surround

On-center

Spot of light in center

Spot of light in surround

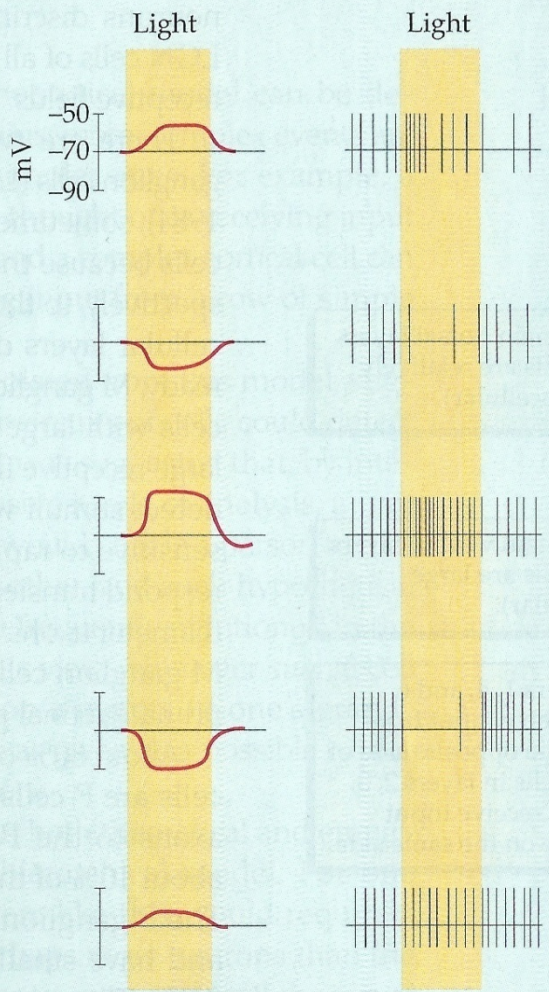
Entire center illuminated

Entire surround illuminated

Diffuse illumination of center and surround

Bipolar cell responses: changes in polarization

Ganglion cell responses: action potentials



(b) An off-center/on-surround cell

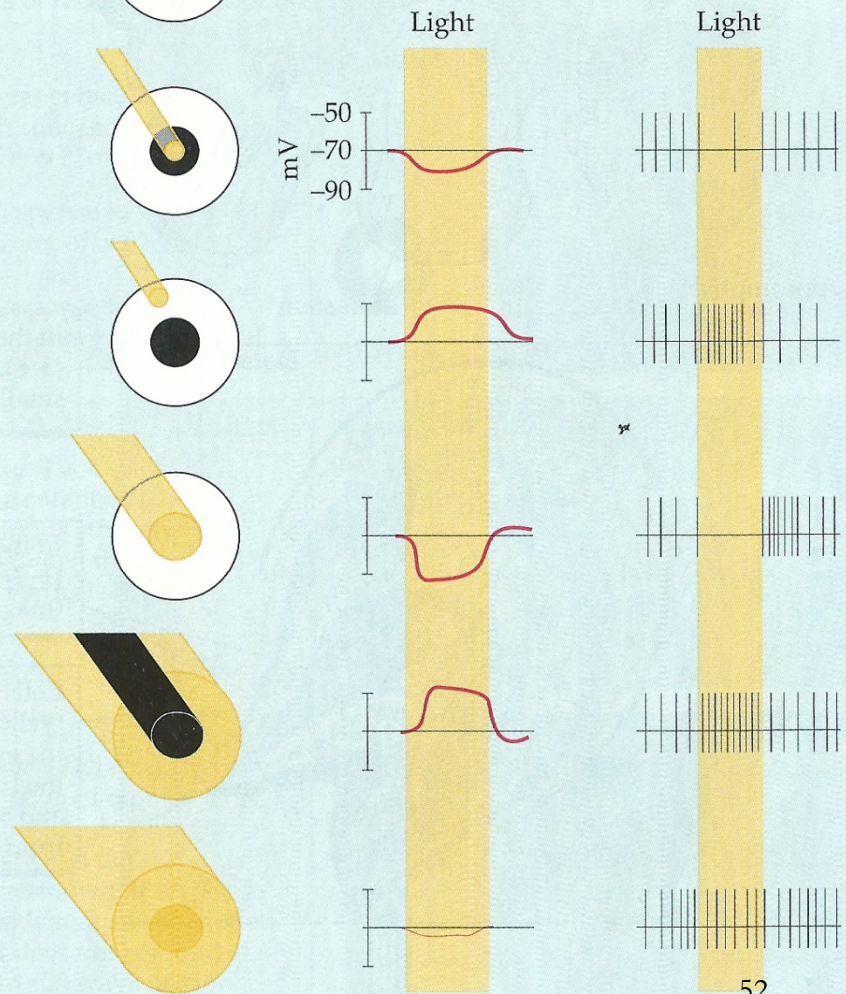
Receptive field

On-surround

Off-center

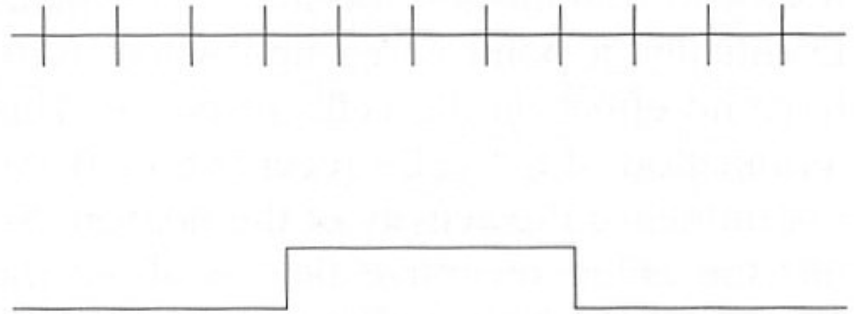
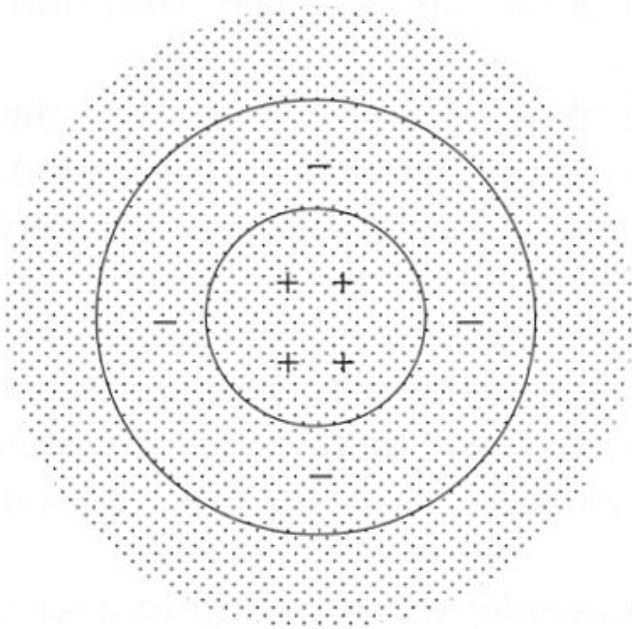
Bipolar cell responses: changes in polarization

Ganglion cell responses: action potentials

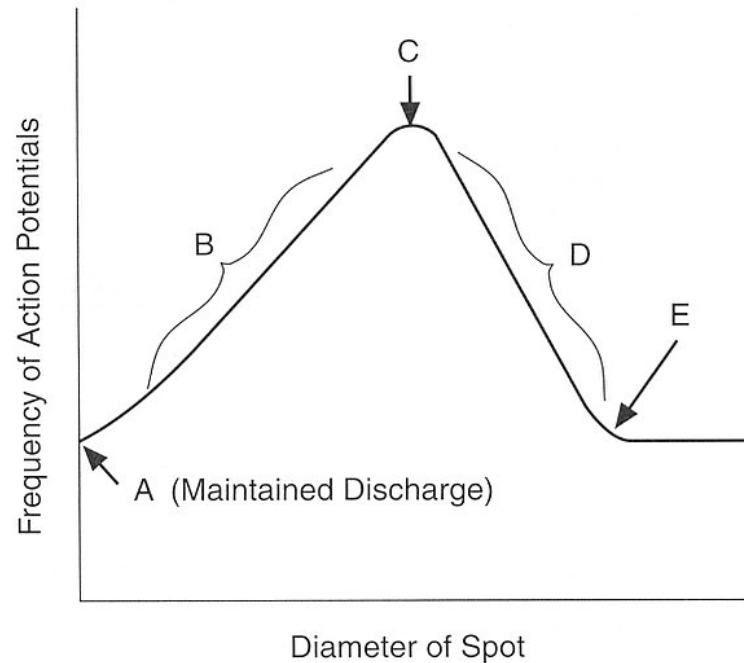
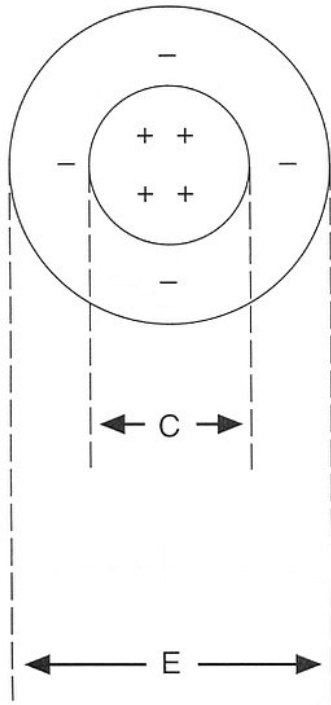




# Respuesta a iluminación difusa

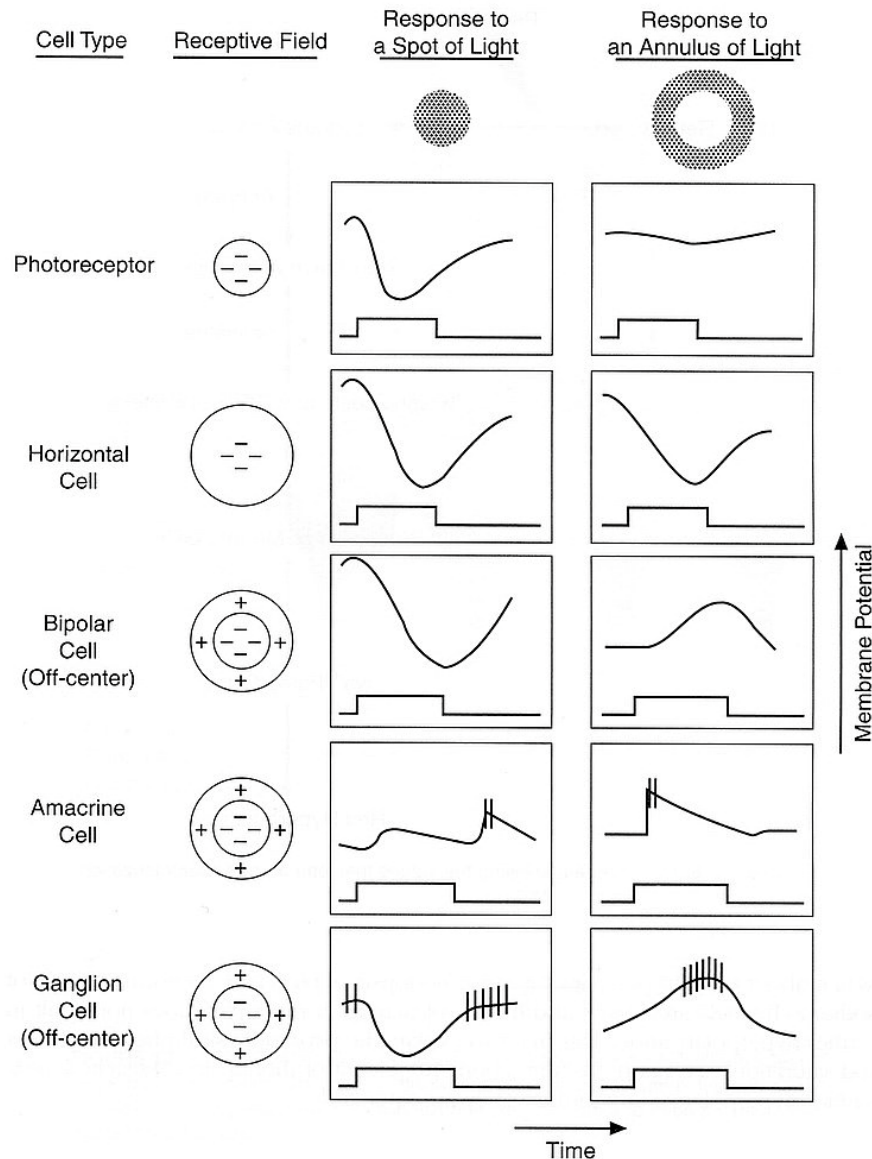


# Registro de la actividad eléctrica de una célula ganglionar de centro-ON



Frecuencia de los potenciales de acción  
en función del diámetro del spot luminoso

# Actividad eléctrica de las células de la retina



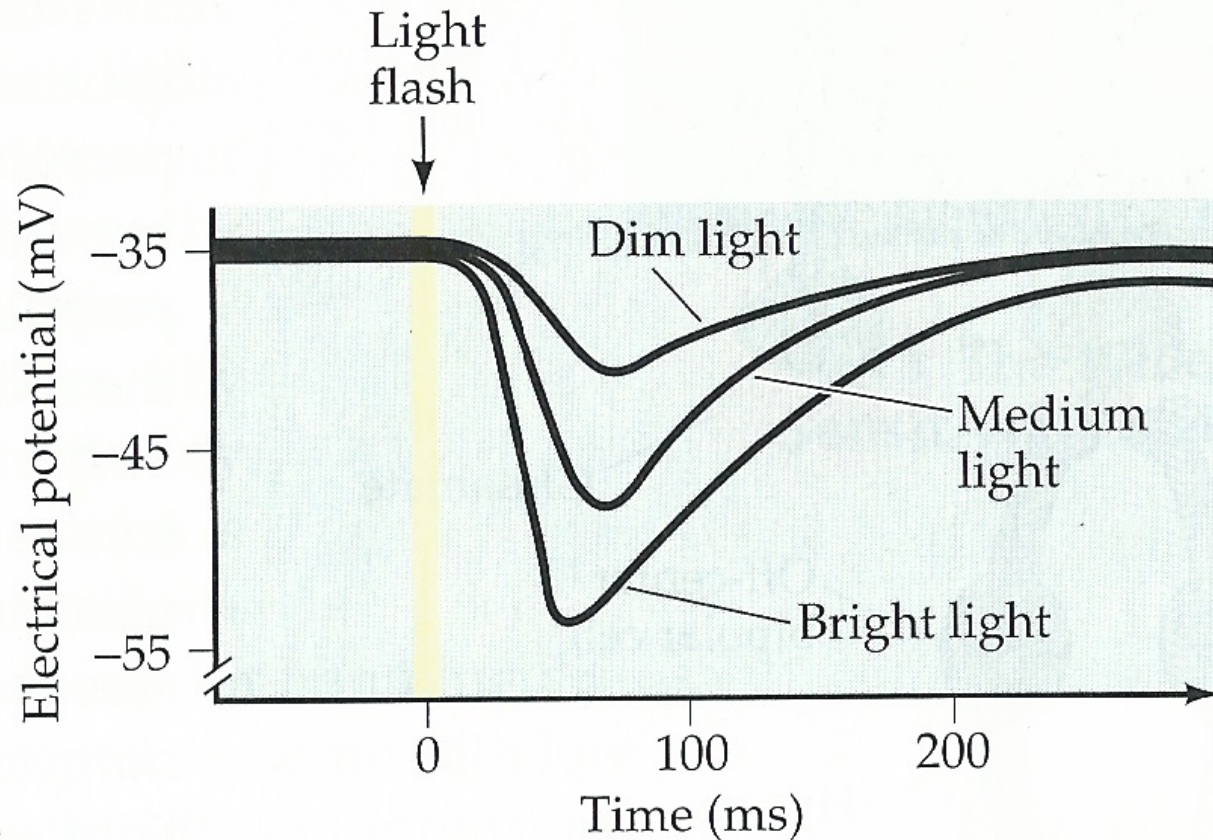
Registros intracelulares de diversas células en la retina

Fotorreceptores, células horizontales y bipolares generan **potenciales graduados o lentos**.

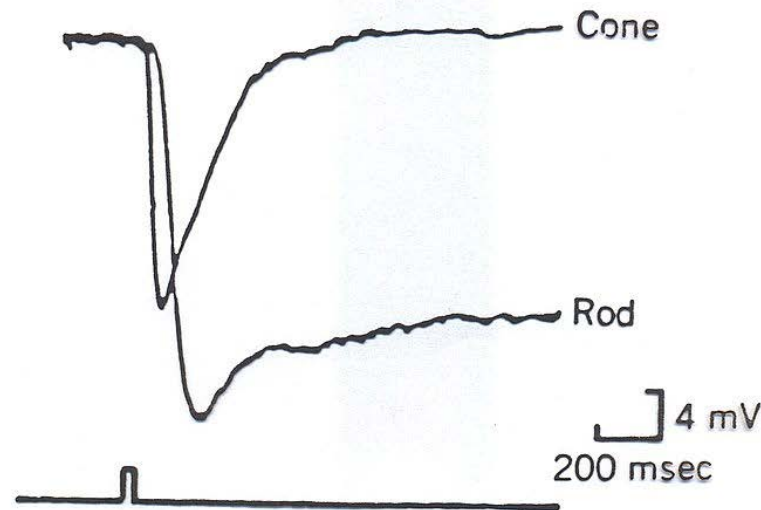
Células amacrinas y ganglionares generan **potenciales de acción**.

# Hiperpolarización del fotorreceptor con la luz

(b) Stimulation hyperpolarizes receptor

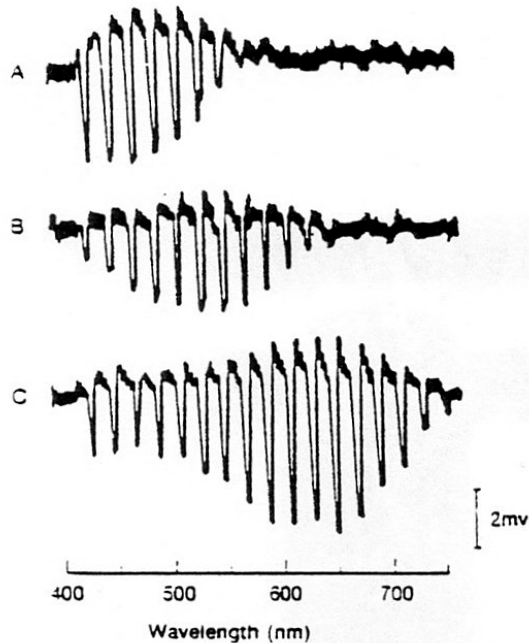


# Hiperpolarización de los fotorreceptores





# Hiperpolarización de los tres tipos de conos



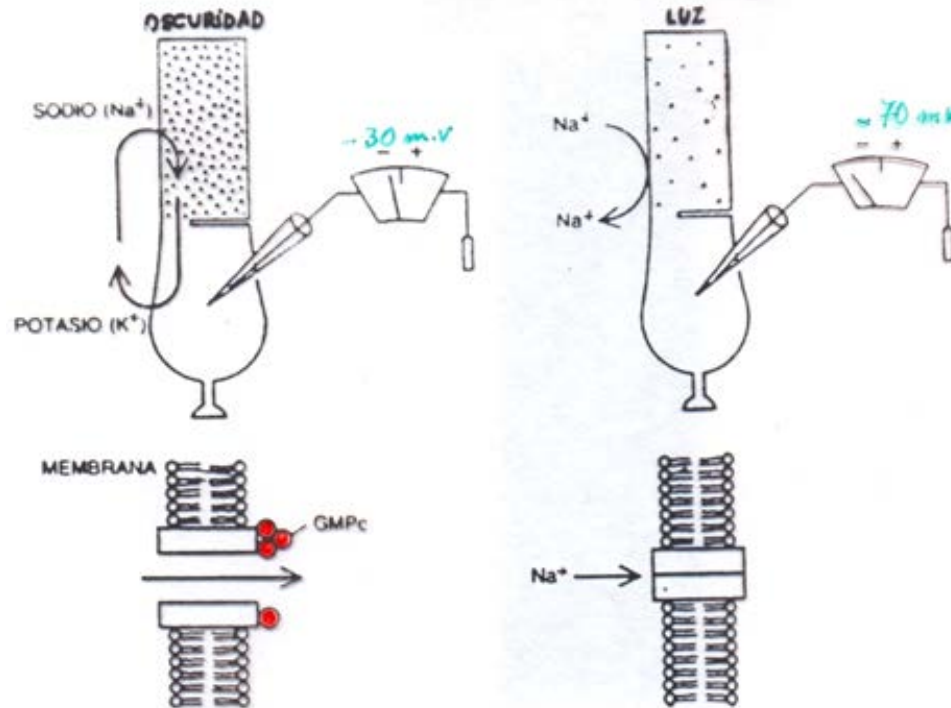
**A) Luz de longitud de onda corta**

**B) Luz de longitud de onda media**

**C) Luz de longitud de onda larga.**

Respuestas de potencial eléctrico de tres clases de conos en la retina de la carpa para varias luces espectrales.

# Mecanismo que origina la respuesta eléctrica del fotorreceptor a la luz



**En la oscuridad**, los canales de cationes en la membrana del segmento externo de los bastones están abiertos. Esto **despolariza** el bastón ( $-30 \text{ mV}$ )

**Con luz**, los canales iónicos se cierran y el bastón se **hiperpolariza** ( $-70 \text{ mV}$ )

In the DARK

1 Rhodopsin molecules are inactive.

2 Sodium channels are kept open by cyclic GMP.

3 Sodium ions flow into the rods, partially depolarizing them.

4 Rods continuously release glutamate.

In the LIGHT

1 Light bleaches rhodopsin molecules.

2 As a result, cyclic GMP is broken down and sodium channels close.

3 Sodium ions cannot enter rods, and, as a result, the rods become hyperpolarized.

4 Glutamate release is reduced.

**Transducción visual: conversión de la luz en señales neurales.**

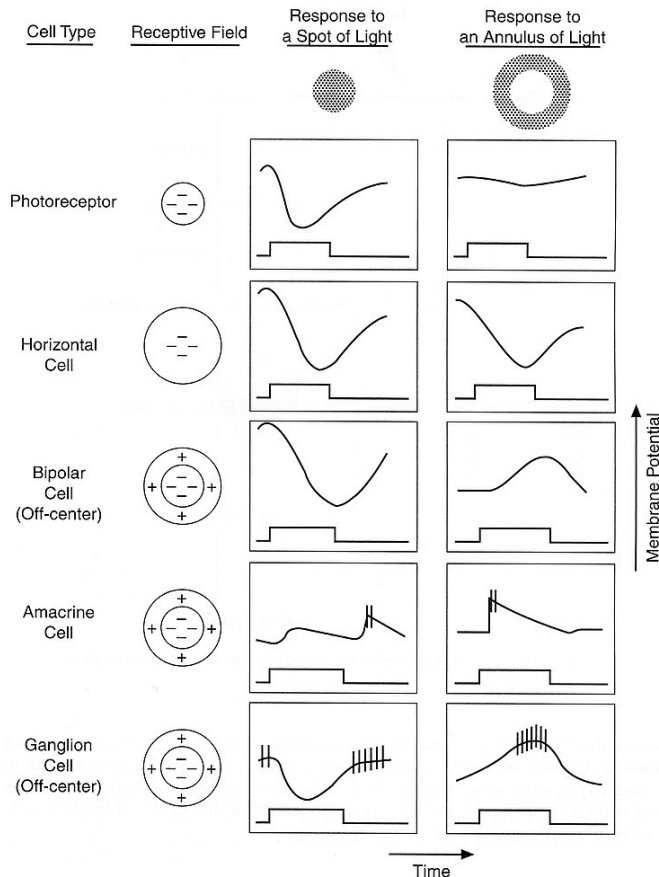
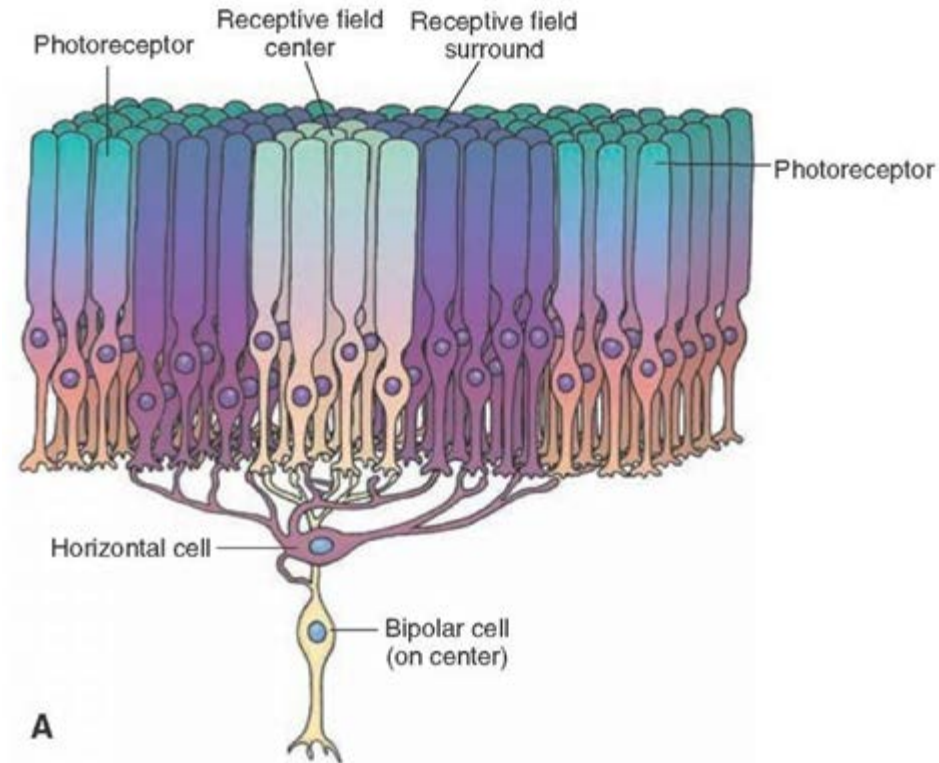
## Activación de los bastones por la luz:

1. La luz blanquea las moléculas de rodopsina.
2. El cGMP se descompone, cerrando canales de sodio
3. Los iones de sodio no pueden entrar en los bastones, lo que produce una hiperpolarización.
4. Se reduce la liberación de glutamato.



# Células horizontales

Una célula horizontal suma las señales de fotorreceptores distribuidos en un área grande de la retina



Respuesta CH: potenciales graduados

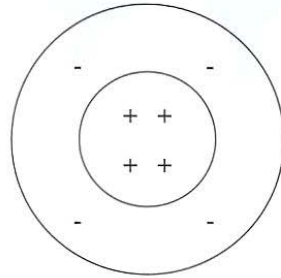
**Los fotorreceptores y las horizontales**

- Se hiperpolarizan en respuesta a la luz
- Se despolarizan en la oscuridad
- Sinapsis conservadora del signo de respuesta

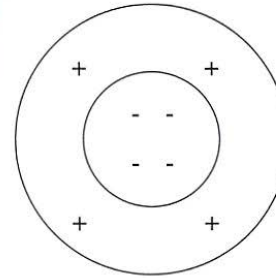
# Células bipolares

## Campos receptores de la célula bipolar

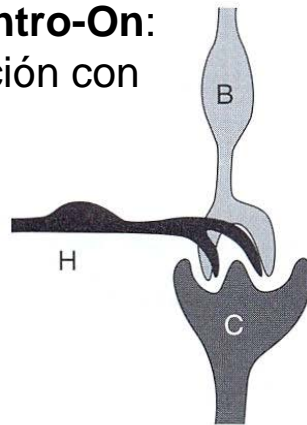
CR centro-On



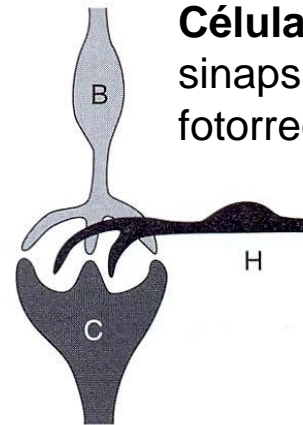
CR centro-Off



**Célula bipolar de centro-On:**  
sinapsis de invaginación con  
el fotorreceptor

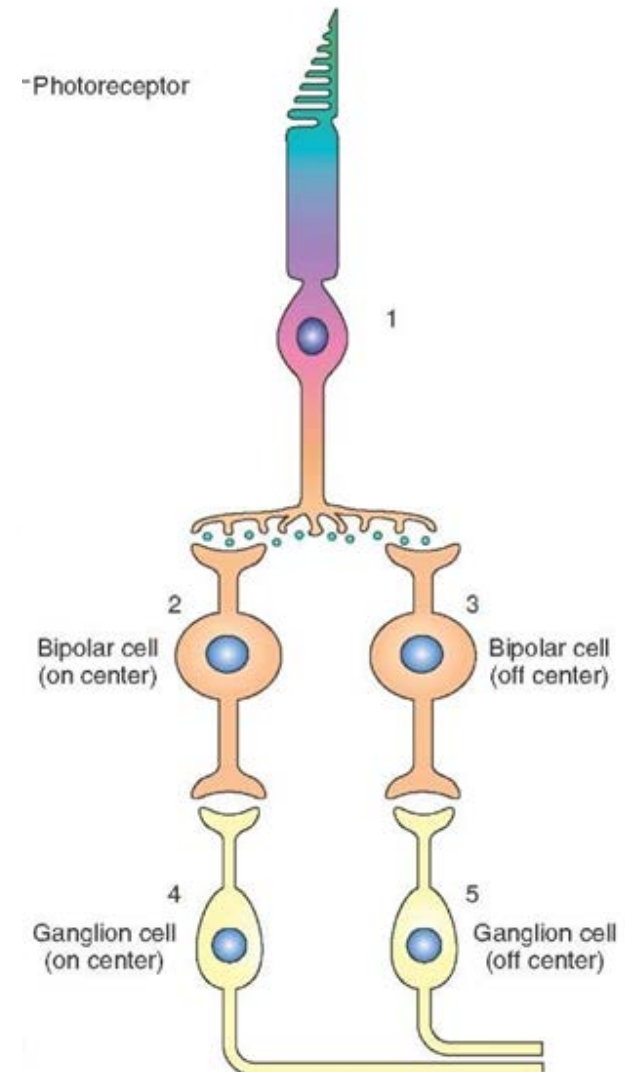
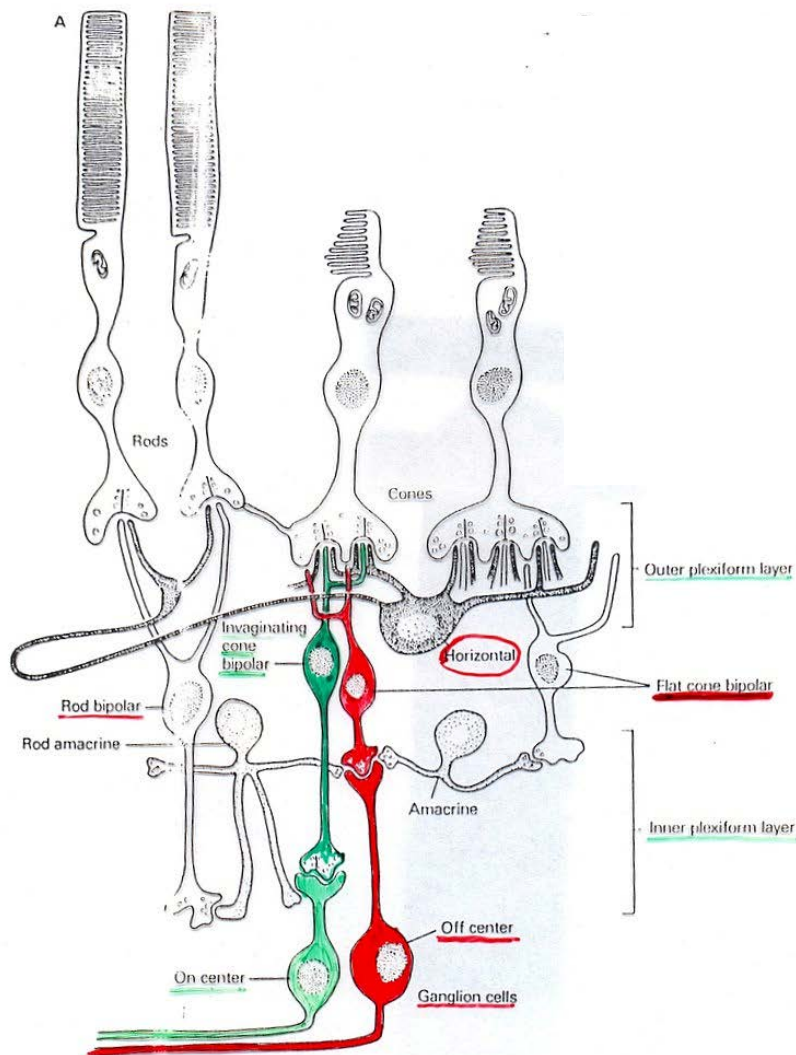


**Célula bipolar de centro-Off:**  
sinapsis plana con el  
fotorreceptor



La señal visual se conduce por vías separadas de centro-ON y de centro-OFF

# Conducción de la señal visual por vías de centro-ON y de centro-OFF



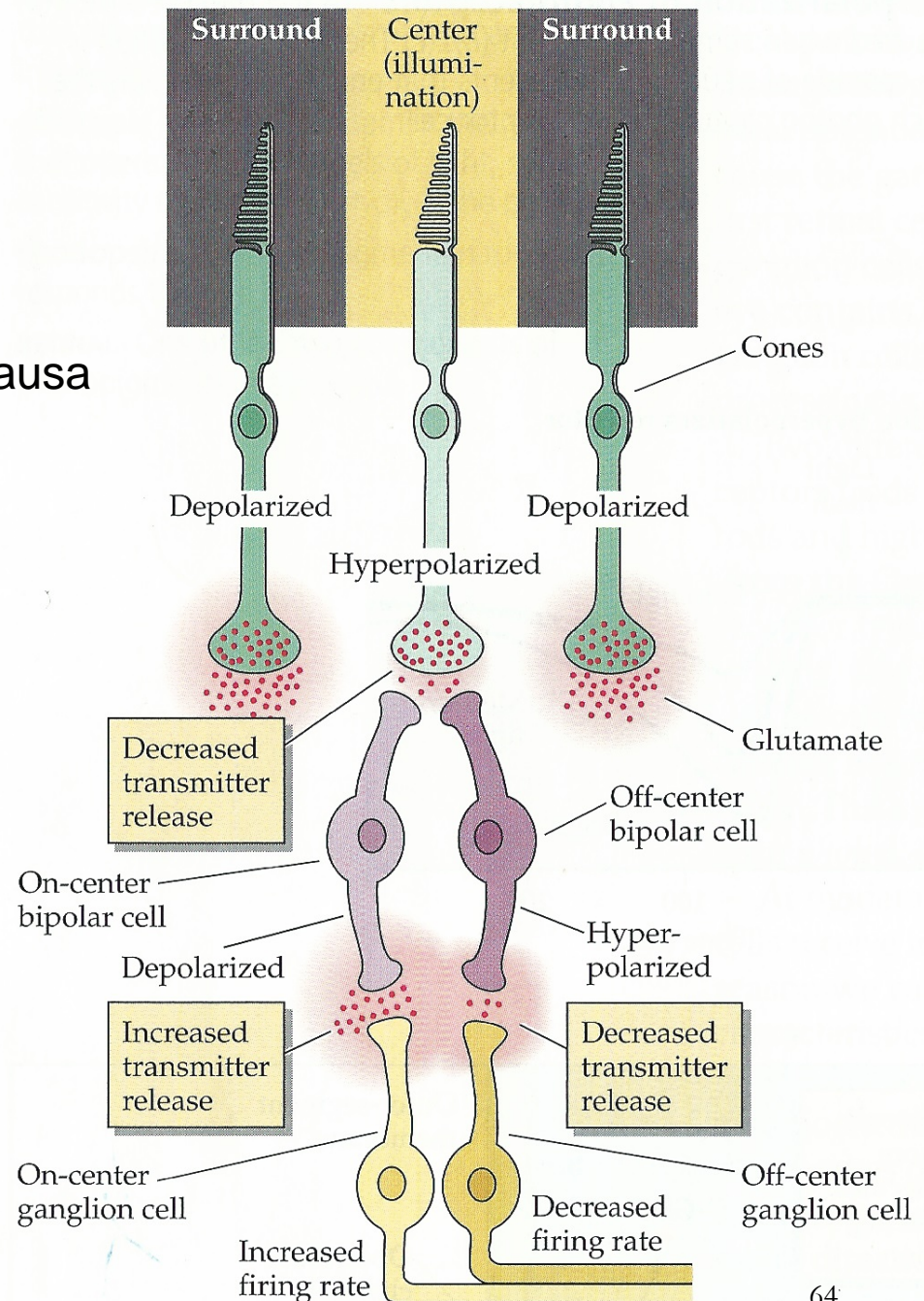
## *Dos sistemas paralelos de procesamiento de la señal visual*

La **hiperpolarización** del FR por **LUZ** causa respuestas diferentes en las bipolares:

- Hiperpolariza la bipolar de centro-Off
- Despolariza la bipolar de centro-On

Neurotransmisor liberado por los fotorreceptores: **glutamato**.

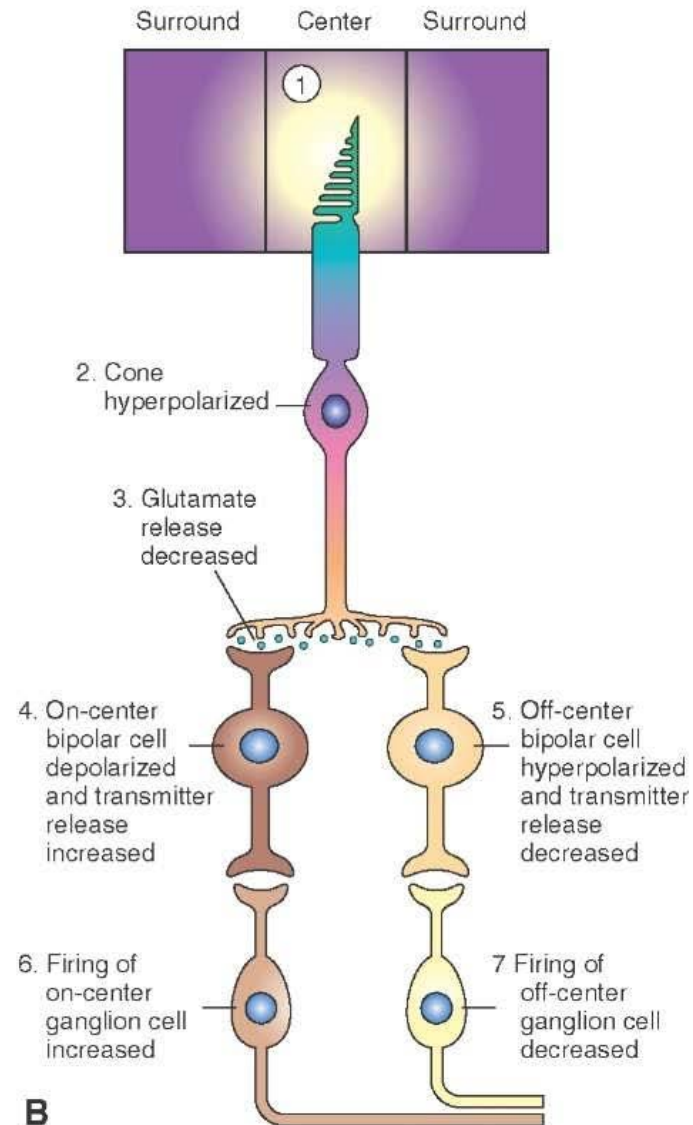
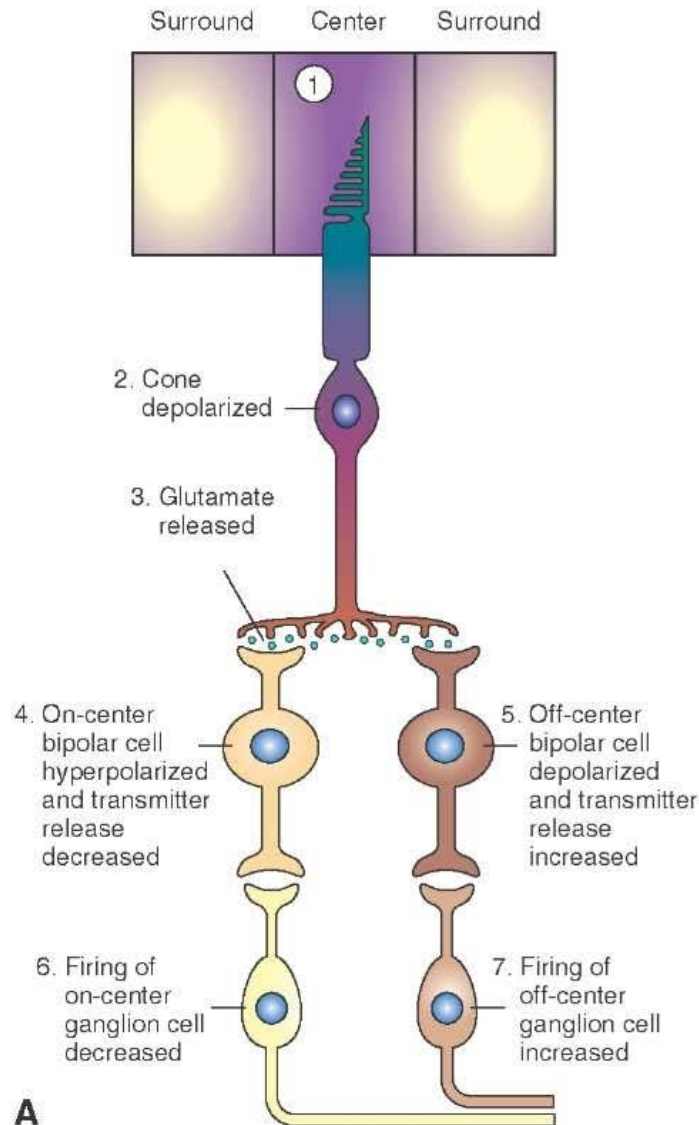
Tiene diferentes efectos sobre las células bipolares.



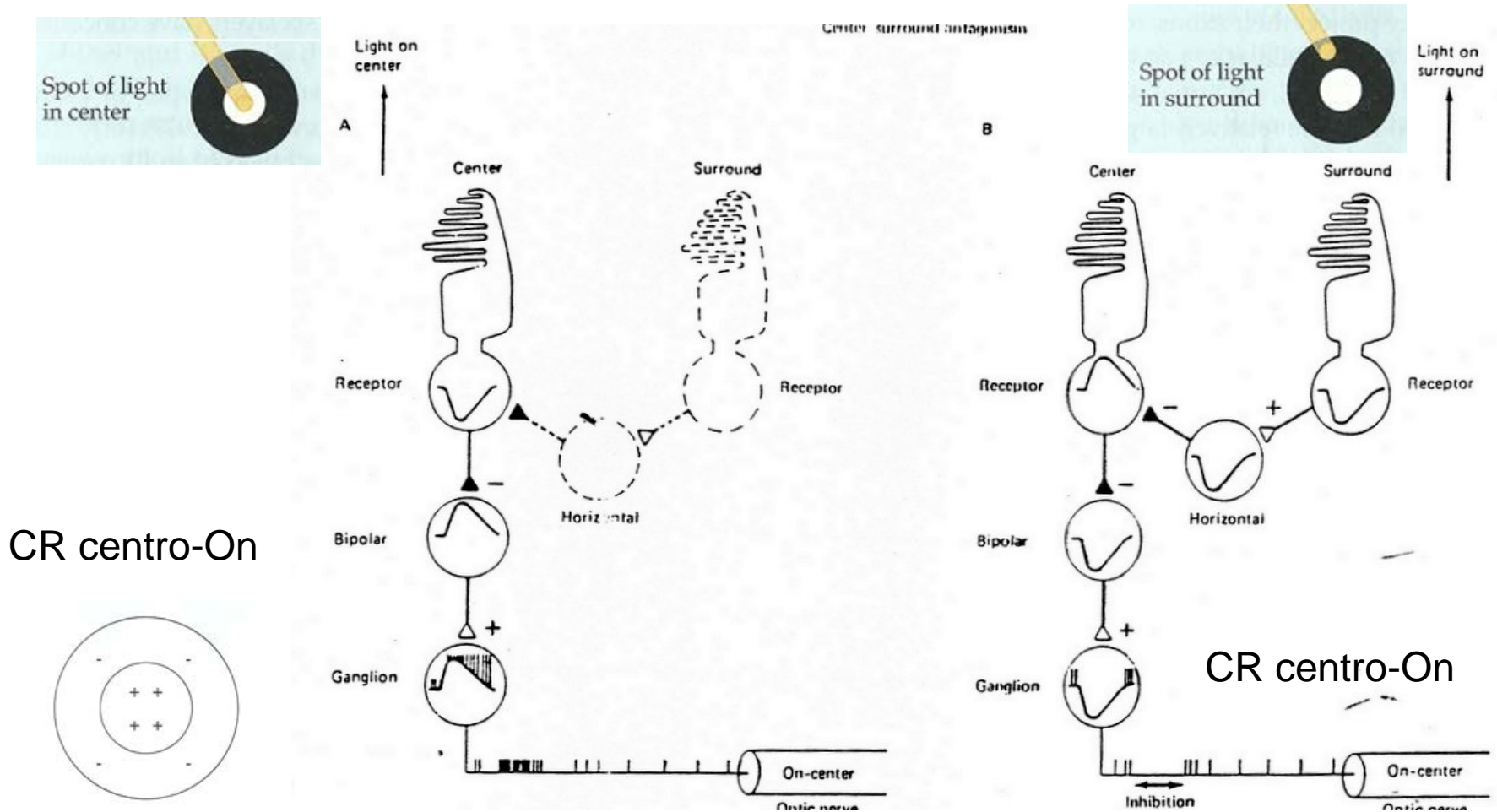


# Cambios en la actividad eléctrica del fotorreceptor, células bipolares y ganglionares cuando:

A) el centro del CR está en la oscuridad y B) el centro del CR está con luz



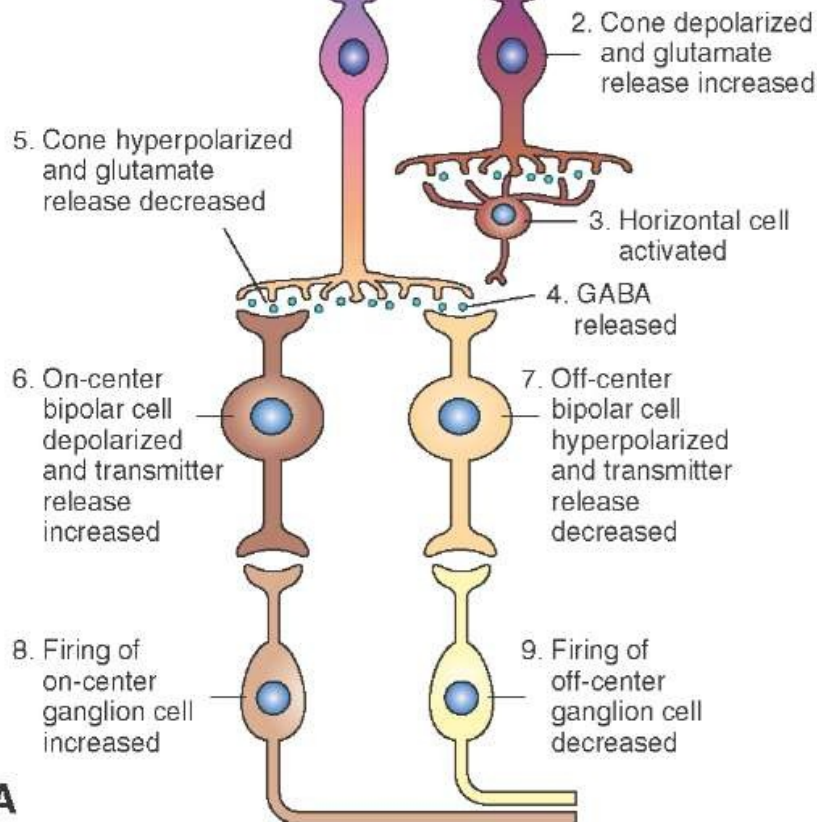
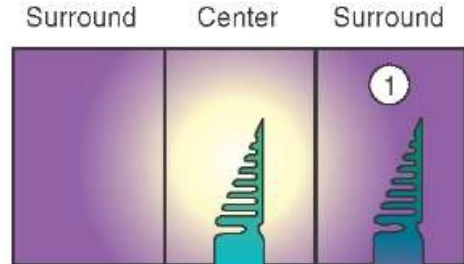
# Inhibición lateral: contribución de las células horizontales al antagonismo espacial en el CR



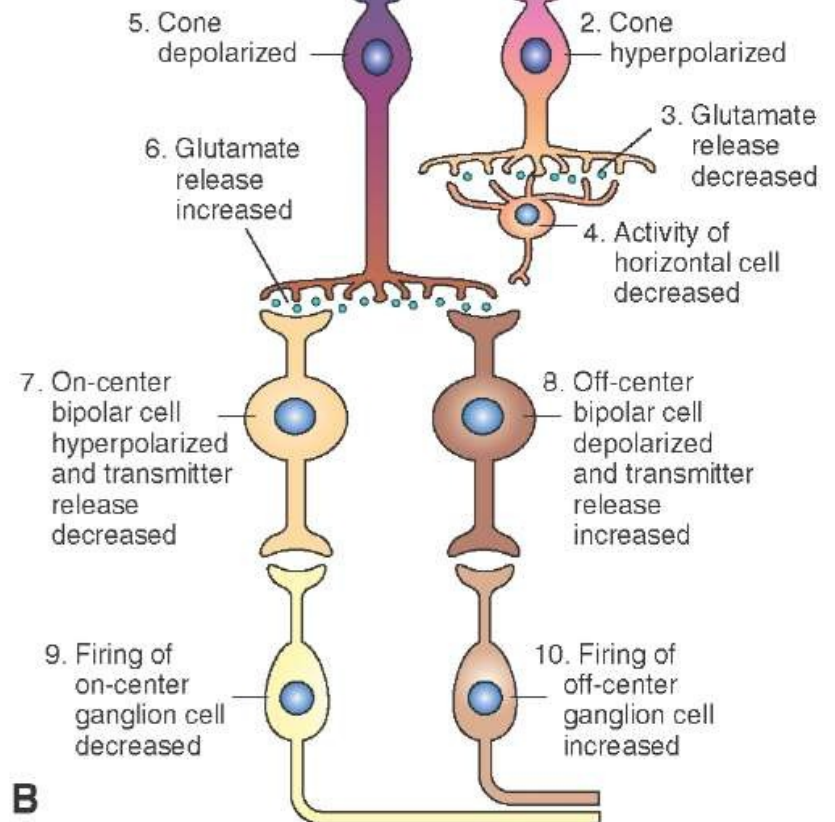
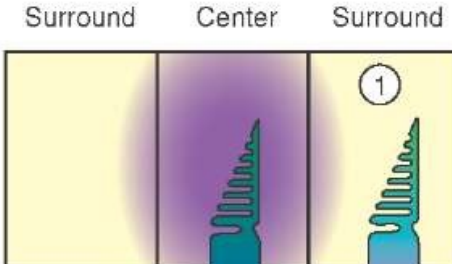
Antagonismo espacial centro periferia.

# Inhibición lateral

## Periferia CR oscuridad



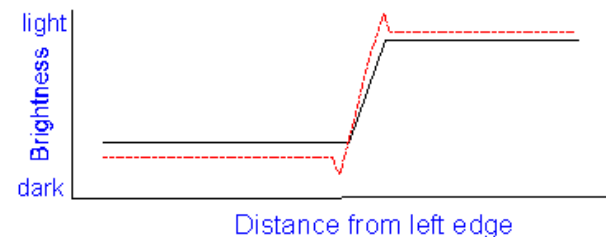
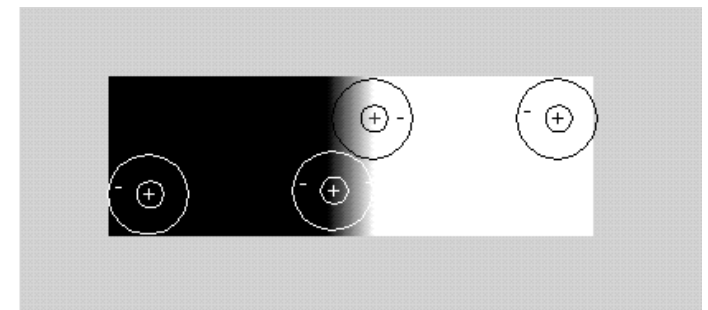
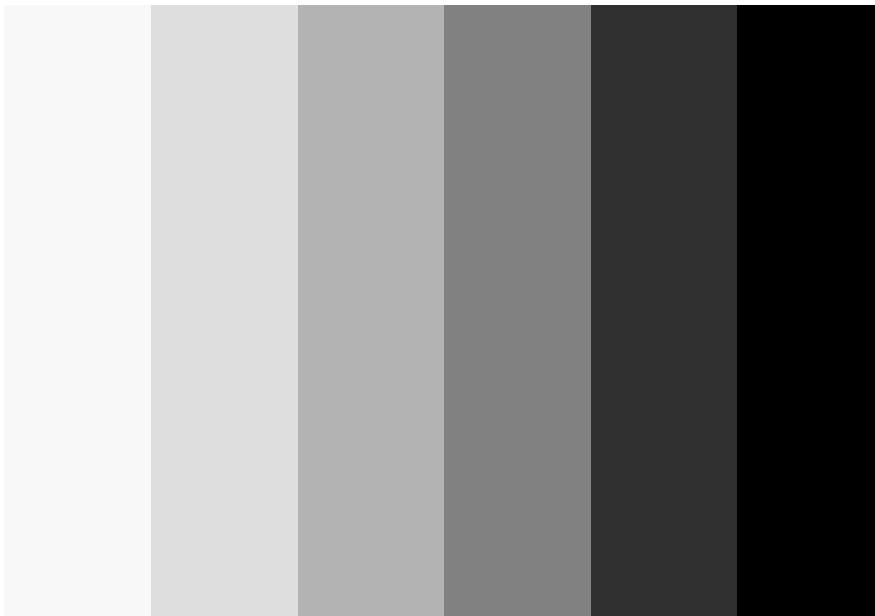
## Periferia CR con luz



# Inhibición lateral: bandas de Mach

## Percepción visual del contraste en los márgenes

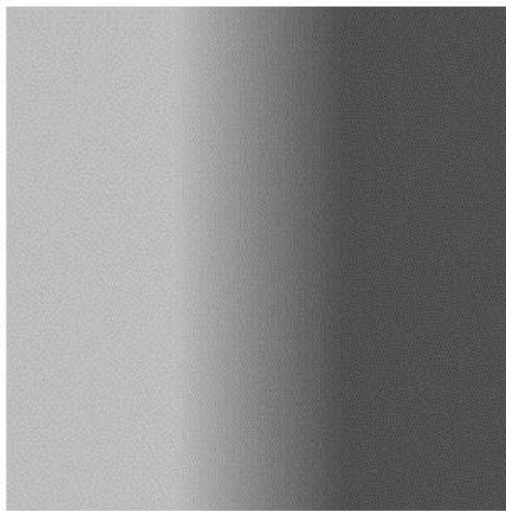
La inhibición lateral consigue que los bordes entre franjas sean más fáciles de ver y por tanto mejora la percepción del contraste.



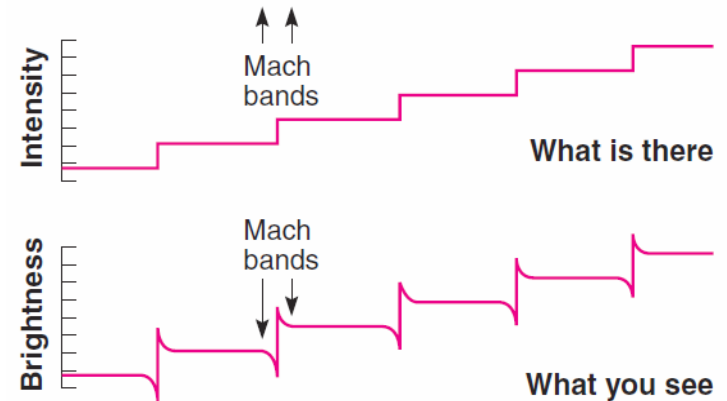
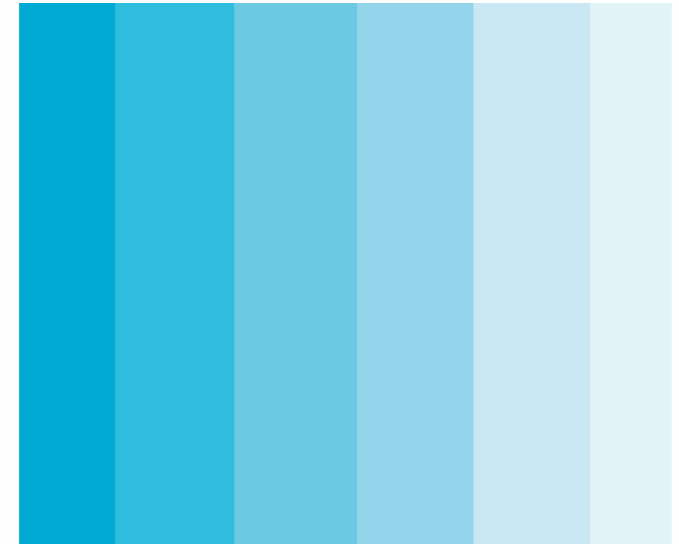
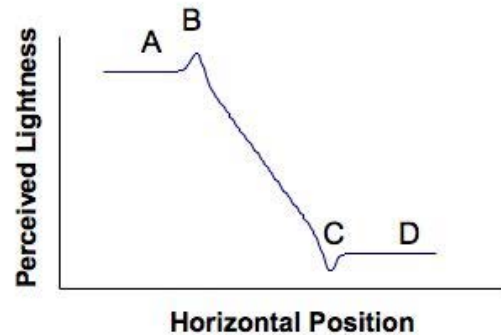
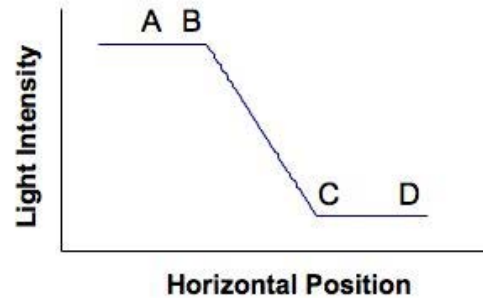
# Percepción visual del contraste en los márgenes

## Ilusión de bandas visibles

### Mach bands

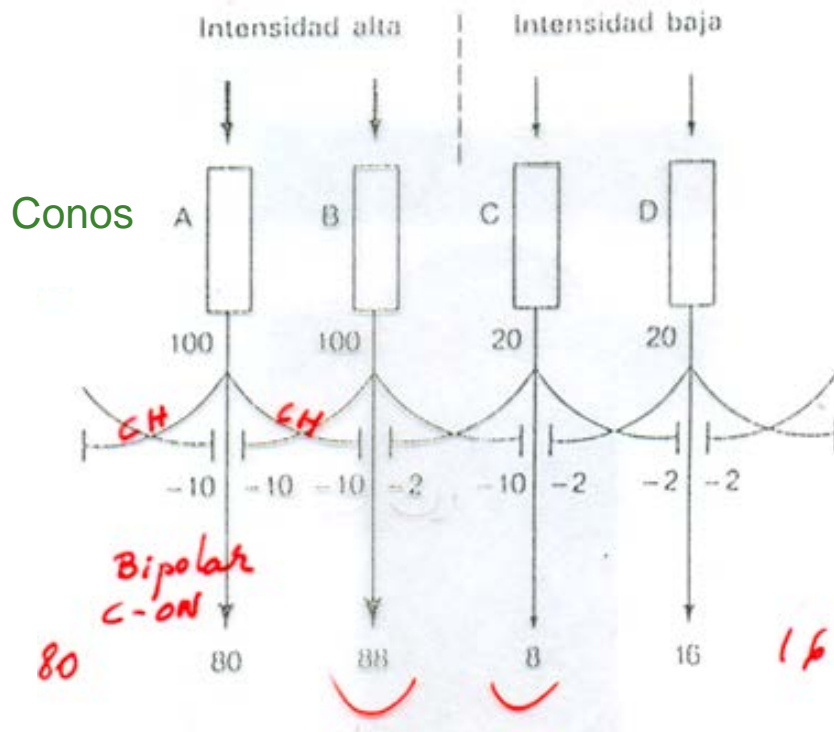


A B C D



# Inhibición lateral

*Ejemplo numérico para un 10% de inhibición lateral*



*Percepción*

